

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Политехнический институт
Факультет «Энергетический»
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
_____И.М. Кирпичникова
_____2019 г.

Разработка регулятора мощности для гибридных ветро-солнечных
энергокомплексов

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ ЮУрГУ–
13.04.02.2019.586 ПЗ ВКР

Руководитель работы
профессор, д.т.н.
_____Е.В. Соломин
_____2019 г.

Автор работы
студент группы П-388
_____В.П. Тищенко
_____2019 г.

Нормоконтролер
старший преподаватель
_____Н.Ю. Аверина
_____2019 г.

Челябинск 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	9
1.1 Актуальность работы.....	9
1.2 Обзор ветро-энергетики	10
1.3 Обзор гелио-энергетики	13
1.4 Управление мощностью ветроэнергетической установки	15
1.4.1 Управление мощностью ВЭУ при постоянной частоте вращения ветроколеса.....	20
1.4.2 Управление мощностью ВЭУ при нескольких фиксированных частотах вращения ветроколеса	21
1.4.3 Управление мощностью ВЭУ изменением установочного угла лопастей или геометрических размеров ветроколеса	23
1.4.4 Управление мощностью ВЭУ при переменной частоте вращения ветроколеса.....	23
1.5 Управление мощностью гелио-установок:.....	24
1.5.1 С использованием контроллера типа On/Off	24
1.5.2 С использованием контроллера в режиме широтно-импульсных (ШИМ) преобразований	25
1.5.3 С использованием контроллера в режиме сканирования точки максимальной мощности (MPPT)	26
1.6 Выводы по главе.....	27
2 РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ВЕТРО-СОЛНЕЧНОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ... ..	28
2.1 Модель ветроколеса в MATLAB/Simulink	31
2.2 Модель солнечного модуля MATLAB/Simulink.....	35
2.3 Выбор типа генератора для ветро-энергетической установки.....	50
2.4 Выбор типа регулятора мощности	53
2.5 Расчет понижающего импульсного преобразователя для ВЭУ	60
2.5.1 Расчет индуктивности	60
2.5.2 Расчет выходного конденсатора.....	62

2.5.3 Расчет диода	63
2.5.4 Расчет электронного силового ключа	63
2.5.5 Расчет входного конденсатора	65
2.6 Расчет понижающего импульсного преобразователя для гелио-установки	66
2. 6.1 Расчет индуктивности	67
2. 6.2 Расчет выходного конденсатора.....	67
2.6.4 Расчет электронного силового ключа.....	68
2.6.5 Расчет входного конденсатора	70
2.7 Модель трехфазного мостового выпрямителя и понижающего импульсного преобразователя для ветро-энергетической установки в программе Matlab/Simulc	70
2.8 Модель понижающего импульсного преобразователя для гелио-установки в программе Matlab/Simulc.....	72
2.9 Модель управляющего контроллера в программе Matlab/Simulc	73
2.10 Модель гибридного ветро-солнечного энергокомплекса в программе Matlab/Simulc	75
2.11 Выводы по главе.....	75
3 ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ВЕТРО-СОЛНЕЧНОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА.....	77
3.1 Исследование модели ветро-энергетической установки	77
3.2 Исследование модели гелио - установки.....	80
3.3 Выводы по главе.....	83
4 РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ	84
4.1 Выводы по главе.....	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	89
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	91
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	94
ПРИЛОЖЕНИЕ А	94
ПРИЛОЖЕНИЕ В	95

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Ограниченность запасов органического топлива, увеличение его стоимости и ухудшение экологической обстановки обуславливают необходимость использования возобновляемых источников энергии, в частности энергии ветра и солнца. Во многих странах мира их вклад в энергетический баланс составляет значительную долю и имеется тенденция к ее увеличению. В России ветро-солнечная энергетика пока не получила широкого развития по ряду причин (наличие крупных месторождений углеводородов, превалирующее развитие тяжелой промышленности и т.д.). Есть и другие весьма серьезные причины, определяющиеся самими принципами действия ветровых и солнечных установок: их нестабильностью при различных значениях солнца и ветра. Более равномерную выработку электроэнергии способны обеспечить гибридные ветро-солнечные установки: на большей части территории России скорость ветра летом сравнительно небольшая, но достаточно много солнца и продолжительный световой день, в то время как зимой, наоборот, много сильных ветров и меньше солнечного света. Поскольку пик работ по производству электроэнергии у ветровой и солнечной систем приходится на различное время суток и года, то гибридная система, соответственно, производит энергии больше, и тогда, когда это действительно необходимо.

Важной задачей является эффективное использование энергии солнца и ветра.

Производительность ветроэнергетической установки зависит от коэффициента использования энергии ветра (КИЭВ) – отношение аэродинамической мощности ветроколеса к полной мощности набегающего ветрового потока, проходящего через ометаемую площадь ветроколеса ВЭУ.

Эффективность солнечной установки (коэффициент полезного действия) определяется отношением мощности, отдаваемой установкой, к входной мощности падающего излучения.

В связи с этим повышение производительности гибридного ветро-солнечного энергокомплекса за счет увеличения эффективности ее главных компонентов (ветроколеса, солнечной батареи) с помощью совершенствования управления мощностью является актуальным. Этому вопросу посвящена данная работа.

Объект исследования - электротехнический комплекс на основе ветро-солнечной установки, состоящий из ветродвигателя, электрического генератора, солнечных панелей, накопителя электрической энергии, контроллера ветро-солнечной установки.

Предмет исследования – регулятор мощности гибридных ветро-солнечных энергокомплексов

Цель выпускной квалификационной работы – разработка регулятора мощности для гибридных ветро-солнечных энергокомплексов

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

Задачи:

1) Разработать имитационную компьютерную модель гибридного ветро-солнечного энергокомплекса.

2) С помощью имитационной компьютерной модели исследовать производительность ветро-солнечных установок при применении различных способов и алгоритмов управления ветро-солнечной установкой. Разработать алгоритм управления мощностью ветро-солнечного энергокомплекса, обеспечивающей высокую производительность ветро-солнечной установки.

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Актуальность работы

Обострившиеся в последнее время проблемы с подключением загородных домов и удаленных объектов к сетям централизованного электроснабжения вынуждают к поиску альтернативных способов электроснабжения.

В последние годы стоимость подключения к сетям централизованного электроснабжения значительно возросла. Так, например, в Московской области стоимость подключения 1 кВт установленной мощности составляет более 1000 долларов США, стоимость прокладки ЛЭП в настоящее время колеблется от 12 до 20 тысяч долларов США за каждый километр.

Самым распространенным способом решения проблемы электроснабжения в таких случаях является использование генераторов переменного тока с приводом от бензинового или дизельного двигателя внутреннего сгорания (ДВС), однако такое решение требует высоких эксплуатационных расходов, связанных с доставкой дорогостоящего топлива и частым ремонтом ДВС. Так в районах Крайнего Севера, Дальнего Востока и Сибири более половины бюджета тратится на завоз топлива для обеспечения электроснабжения [22]. При этом в основном целевыми потребителями электроэнергии являются относительно небольшие объекты АПК (фермы, артели, жилые строения и т.д.) [24].

Альтернативой получению электроэнергии с помощью ископаемого топлива может быть использование энергии возобновляемых источников энергии (например, энергии солнца или ветра). Достоинством такой системы является независимость от ископаемого топлива, к примеру, газовые генераторы можно эффективно использовать фактически там, где подведены газовые магистрали. К тому же все меры по проведению газа являются временными в связи с ограниченными запасами голубого топлива [Е.В. Соломин // Масштабируемые гибридные ветро-солнечные установки малой мощности]

Переход на систему бесперебойного электроснабжения использующую только возобновляемый источник энергии (энергию солнца или ветра) осложняется следующими проблемами:

- непостоянство энергии ветра или солнца
- необходимость увеличения мощности ветрогенераторов, солнечных панелей.
- необходимость увеличения емкости аккумуляторных батарей

Поэтому для практически бесперебойного электроснабжения целесообразно использовать гибридные ветро-солнечные системы. Бесперебойное электроснабжение обеспечивается за счет дублирования и/или комбинирования источников энергии: ветроэнергетическая установка и батарея из солнечных модулей являются взаимодополняющими

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

генерирующими системами [22]. В большинстве районов приход солнечной радиации и наличие ветра находятся в противофазе (т.е. когда светит яркое солнце, обычно нет ветра, а если дует сильный ветер, то солнца нет)

Идея использовать гибридную ветро-солнечную систему электроснабжения довольно часто рассматривается в работах как зарубежных, так и российских ученых [9; 12; 28; 30].

Эффективность такой системы определяется в первую очередь ценой киловатт-часа электроэнергии для конкретной местности, и целесообразность внедрения установок возобновляемой энергетики, даже при их высокой стоимости, для данных регионов будет оправдана, если в них:

- отсутствует централизованное электроснабжение и подключение к сети сопряжено с большими трудностями и затратами;
- действуют механизмы поддержки возобновляемой энергетики;
- постоянно дуют сильные ветра (прибрежные зоны) и сохраняется высокий уровень солнечной радиации (южные районы) в течение года. [9]

1.2 Обзор ветро-энергетики

В ряде стран за счет совершенствования технологий ветро-энергетика выделились в отдельные отрасли (Дания, Бельгия, Германия, США, Китай) и уверенно конкурирует с традиционной энергетикой [1].

Существует различные типы ветроустановок: роторные, карусельные, барабанные. Однако, на данный момент, широкое распространение получили лопастные конструкции с вертикальной и горизонтальной осью вращения.

На данный момент все ВЭУ можно разделить на высокоэффективные лопастные конструкции с вертикальной и горизонтальной осью вращения. [Соломин Евгений Викторович // Методологические основы разработки и создания вертикально-осевых ветроэнергетических установок для агропромышленного комплекса России]

Вращающий момент на ветроколесе обоих видов ВЭУ происходит под действием подъемной силы, возникающей при обтекании ветром лопастей.

План скоростей и сил, действующих на элемент лопасти вертикально-осевого ветродвигателя изображен на Рисунке 1.1

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

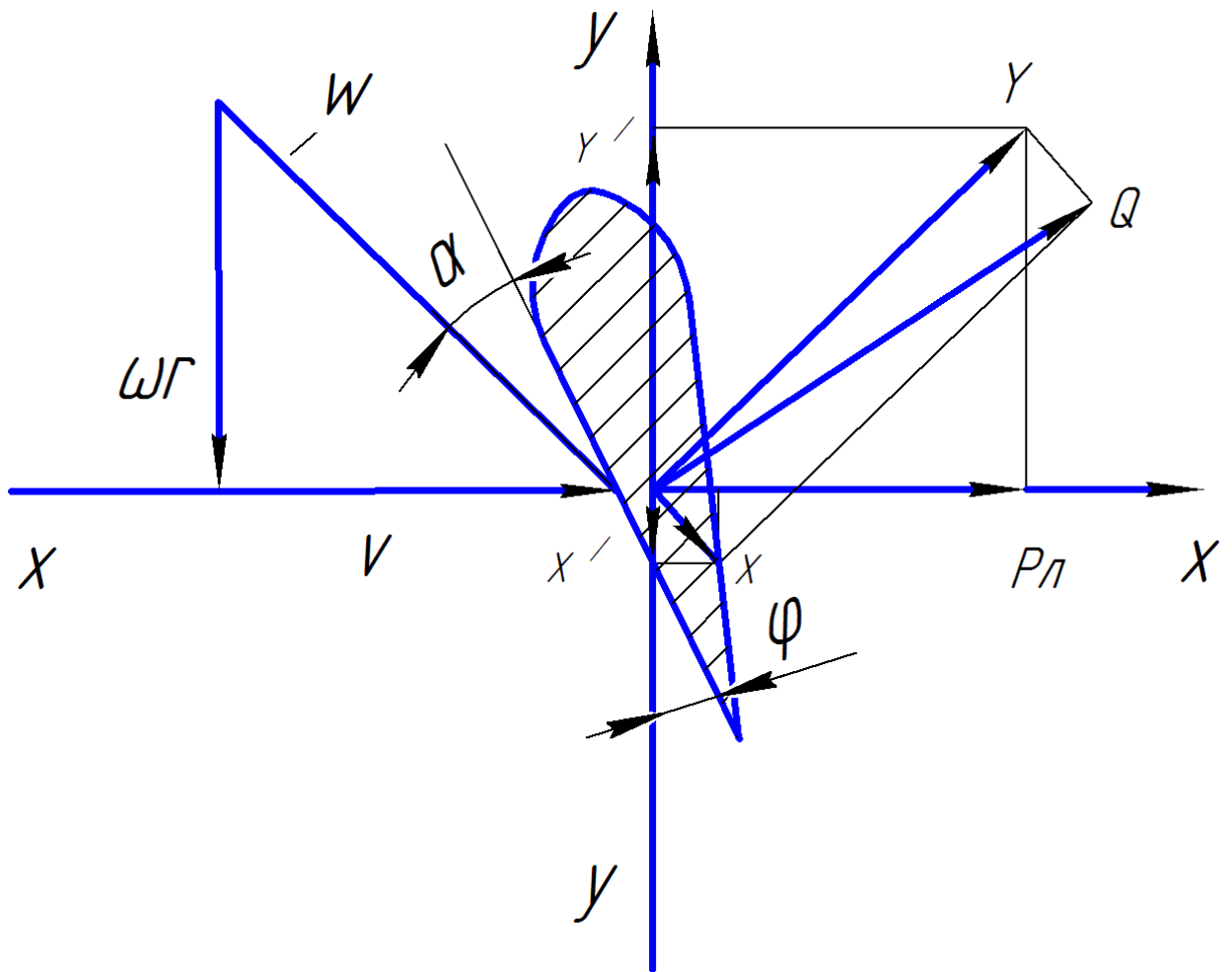


Рисунок 1.1 – План скоростей и сил, действующих на элемент лопасти

Принцип работы горизонтально-осевого ветродвигателя состоит в следующем: ветровой поток набегаёт на ротор со скоростью V , при этом скорость лопасти ветродвигателя равна ωr . Геометрическое сложение скоростей ветра V и ветродвигателя ωr создаёт результирующую относительную скорость W воздушного потока, набегающего на часть лопасти под углом атаки α относительно хорды лопасти. Относительная скорость W создаёт силу Q , которая является результирующей подъёмной силы Y и силы сопротивления X . Составляющая подъёмной силы Y , действующей по оси y - y' , обеспечивает вращение ветродвигателя. Сила сопротивления X , увеличивающая лобовое давление $P_{л}$, создаёт составляющую сопротивления вращению X' . Буквой φ на схеме обозначен угол заклинивания ротора.

Таким образом, кинетическая энергия ветра преобразуется в механическую энергию вращения ротора с последующим её преобразованием в другие виды энергии.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Первый ветрогенератор был сконструирован в 1887 году в Шотландии Джемсом Блитом для зарядки аккумуляторных батарей. Эта ВЭУ принадлежала к типу ГО пропеллерных ВЭУ.

Большой вклад в создание и развитие теории ветродвигателей принадлежит русскому ученому Н.Е. Жуковскому и его ученикам: Г.Х. Сабинину, В.П. Ветчинкину, Г.Ф. Проскура и др.

В 1920 году Н.Е. Жуковский в своей статье «Ветряная мельница типа НЕЖ» изложил теорию идеального ветродвигателя (сейчас эту теорию принято называть классической). Согласно классической теории идеального ветродвигателя максимальный Коэффициент Исползования Энергии Ветра (КИЭВ) идеального ветродвигателя равен 0,593. Это значит, что идеальный ветродвигатель может использовать не более 59,3% от всей энергии набегающего ветрового потока. Почти в это же время немецкий ученый Альберт Бетц получил идентичный результат, поэтому во всем мире это значение называется предел Бетца – Жуковского.

Свои теории идеального ветродвигателя разработали ученые Г.Х. Сабинин, Г. Ф. Проскура. По теории Г.Х. Сабинина КИЭВ идеального ветродвигателя равен 0,687.

Зная максимальный КИЭВ и реальный для конкретной ветроустановки, можно судить об ее эффективности.

Если первые горизонтально-осевые ВЭУ изобретены в 19 веке, то первая вертикально-осевая ВЭУ была изобретена лишь в первой половине 20 века (ротор Савониуса – 1929 год). Ротор Савониуса имеет лопасти S – образной формы. Для создания вращающего момента используется сила сопротивления и подъемная сила.

Позже были изобретены ротор Дарье – в 1931 году, ротор Масгроува – в 1975 году. Вращающий момент ветроколеса этих типов образуется под действием подъемной силы.

Долго считалось, что ГО ВЭУ имеет больший коэффициент использования энергии ветра, чем ВО ВЭУ. Из-за этого ВО ВЭУ почти 40 лет не разрабатывались.

С 1970 – х годов совет National Research Council of Canada (NRC) занимался разработкой ротора Дарье. Экспериментально было доказано, что у вертикально-осевых роторов, использующих подъемную силу лопастей (роторов Дарье, Эванса, Масгроува) КИЭВ не ниже, чем у горизонтально-осевых (ГО) пропеллерных ВЭУ.

Для этих роторов указанное максимальное отношение линейной скорости рабочих органов к скорости ветра достигает 6:1 и выше [22]. В итоге вертикально-осевые ВЭУ стали интенсивно осваивать только с начала 80-х годов прошлого века [22].

Эти причины повлияли на состояние современного рынка ВЭУ: большинство используемых ВЭУ на данный момент являются горизонтально-осевыми, многие предприятия занимаются серийным выпуском этих установок.

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

Однако, по заявлениям авторитетных ученых в области ветроэнергетики, вертикально-осевые ВЭУ обладают рядом преимуществ перед горизонтально-осевыми пропеллерными ВЭУ:

1) Независимость работы от направления ветра, следовательно, отсутствие поворотных устройств и систем, значительно упрощает конструкцию установки по сравнению с ГО ВЭУ.

2) За счет отсутствия необходимости ориентировки ротора на ветер удельная выработка ВО ВЭУ может превышать аналогичный показатель ГО ВЭУ в 1,5–2,5 раза [22]

3) Наличие в конструкции ВЭУ системы ориентации на ветер само по себе усложняет ветроагрегат и снижает его надежность [22]

Опыт развитых стран говорит о том, что внедрение вертикально-осевых ВЭУ малой и сверхмалой мощности, а также микро-ВЭУ — экономически выгодное мероприятие, не требующее больших бюджетных затрат. При этом внедрение малых автономных установок с вертикальной осью вращения до 30 кВт может обеспечить полное или частичное энергоснабжение для небольших жилых объектов, офисных или производственных помещений — с целью развития новой инфраструктуры на удаленных территориях страны.

В настоящее время в мире отсутствует системный научный подход и методологии разработки ветроэнергетических установок малой мощности для автономных потребителей. Разработка агрегатов ведется покомпонентно, без учета взаимовлияния элементов установки друг на друга. Существующие стандарты по ветроэнергетике (особенно в России) серьезно устарели и не отражают в полной мере требований к современным агрегатам. [22]

1.3 Обзор гелио-энергетики

Человечество с древних времен использовало солнечную энергию. По мере накопления знаний, опыта, открытий в различных научных сферах, ученые создавали устройства преобразующие энергию солнца в другие виды энергии: электрическую, тепловую.

Американский ученый Чарльз Фритс в 1883 году создал первый фотоэлемент, он состоял из тонкого слоя селена, расположенного между пластинами золота и меди. В 1887 году Генрих Герц открыл внешний фотоэффект — испускание веществом электронов под действием электромагнитных излучений.

Внешний фотоэффект изображен на Рисунке 1.2

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

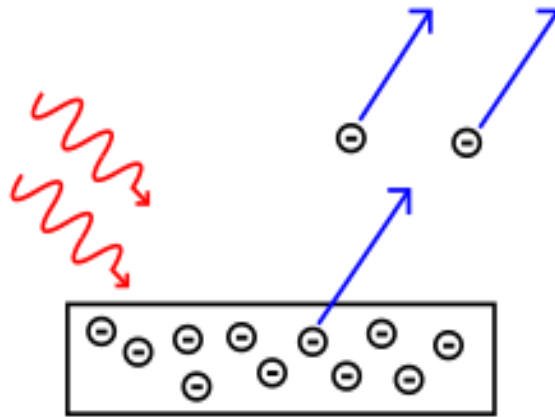


Рисунок 1.2 - внешний фотоэффект

Явлению фотоэффекта посвятили свои работы ученые Александр Столетов, Томсон, Филипп Ленард и другие.

Альберт Эйнштейн в 1905 в своей работе объяснил природу фотоэффекта: каждый фотон, при взаимодействии с электроном передает ему свою энергию $h\nu$.

Эта энергия определяется по формуле:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}, \quad (1.1)$$

где h - постоянная планка,

ν - частота падающего света,

A - работу выхода.

Одна часть энергии фотона идет на работу выхода A , другая часть превращается в кинетическую энергию электрона.

Появление полупроводников привело к созданию кремниевого фотоэлемента. На пластине кремния n-Si с электронным типом проводимости (основные носители зарядосвободные электроны) помещают слой кремния p-Si с дырочной проводимостью (носители заряда атомы, потерявшие электрон-«дырки»). При освещении фотоэлемента в зоне p-n перехода возникает разность потенциалов около 0,5В, что и используют для изготовления солнечных батарей.

На данный момент наибольшее распространение получили солнечные модули на основе кремния трёх видов: монокристаллического, поликристаллического и аморфного. В промышленном производстве находятся солнечные модули со следующим КПД:

- 1) монокристаллический: 15 – 16% (до 24% на опытных образцах);
- 2) поликристаллический: 12 – 13 % (до 16% на опытных образцах);
- 3) аморфный: 8 – 10% (до 14% на опытных образцах).

Все эти данные соответствуют так называемым однослойным элементам. В настоящее время исследуются двух- и трёхслойные фотоэлементы, которые позволяют исследовать большую часть солнечного спектра по длине волны солнечного излучения. Для двухслойного фотоэлемента на опытных образцах получен КПД 30%, а трёхслойного до 40%.

Гелио-энергетика за последние 20 лет сформировалась в полноценную область экономики во многих странах мира (США, Германия, Испания, Япония и др.) В 2010–2013 гг. рост занятости в различных секторах солнечной энергетики, например, в США составил от 14 до 35 % [1]. Рост мирового рынка фотоэлектрических элементов составил в 2013 г. 20 % [2]. В России рынок солнечных установок пока развит слабо, кроме того, существующий небольшой спрос удовлетворяется в основном за счет импортного оборудования. Тем не менее потенциал развития данной отрасли достаточно высок, а «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р) предусматривает достаточно интенсивное развитие возобновляемой энергетики.

Подбор соответствующей продукции должен осуществляться исходя из ряда особенностей как локального характера климата, так и особенностей потребителя.

В настоящее время отсутствует научный подход в комплексном применении малой гелио-энергетики: стандарты ориентированы на устаревшее оборудование, нет четкого обоснования использования гибридных и когенерационных установок.

Интеллектуальная собственность представлена наличием большого числа патентов на изобретения и полезные модели. Тем не менее, гибридные конструкции фактически отсутствуют в патентных базах данных, хотя и являются патентоспособными как помодульно, так и в целом.

При разработке той или иной системы автономного энергоснабжения для достижения ее наибольшей эффективности требуется определение оптимального места расположения установки, ее оптимальной конструкции, мощности, конфигурации и состава системы электропитания в зависимости от климатических условий района предполагаемой эксплуатации, а также особенностей нагрузки.

1.4 Управление мощностью ветроэнергетической установки

Необходимость регулирования мощностью ветроэнергетической установки продиктована аэродинамической особенностью ветроколеса [14]

Аэродинамическая мощность ветрового потока, проходящего через площадь ометания ветроколеса, вычисляется по формуле [14]:

$$P_a = C_p \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 ,$$

(1.2)

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

где ρ – плотность воздуха, 1,25 кг/м³;

S – площадь ометания ротора м²;

V – скорость ветра, м/с.

C_p – коэффициент использования энергии ветра, равен отношению механической мощности ветродвигателя $P_{\text{мех}}$ к полной мощности P энергии ветра, проходящей через ометаемую площадь ветроколеса.

$$C_p = \frac{P_{\text{мех}}}{P} \quad (1.3)$$

Из формулы (1.2) можно сделать следующие выводы:

- 1) Так как мощность ветро-установки пропорционально кубу скорости, то незначительное увеличение скорости ветра в некоторых случаях может привести к разрушению лопастей, перегреву обмоток генератора, вибрационным колебаниям (при скорости ветра свыше 15-25 м/с)
- 2) регулировать аэродинамическую мощность ветрового потока можно изменяя C_p или геометрические размеры аэродинамических поверхностей ветроколеса.

Одним из важнейших параметров, от которого зависит C_p является быстроходность Z .

Быстроходность - отношение линейной скорости лопасти к скорости ветра.

$$Z = \frac{V_l}{V_g} \quad (1.4)$$

где V_l - линейная скорость лопасти;

V_g - скорость ветра

Зависимость коэффициента использования энергии ветра C_p от быстроходности Z на примере вертикально-осевой ветроустановки типа ВЭУ-3(6), разработанную специалистами ООО «ГРЦ Вертикаль», изображена на Рисунке 1.3

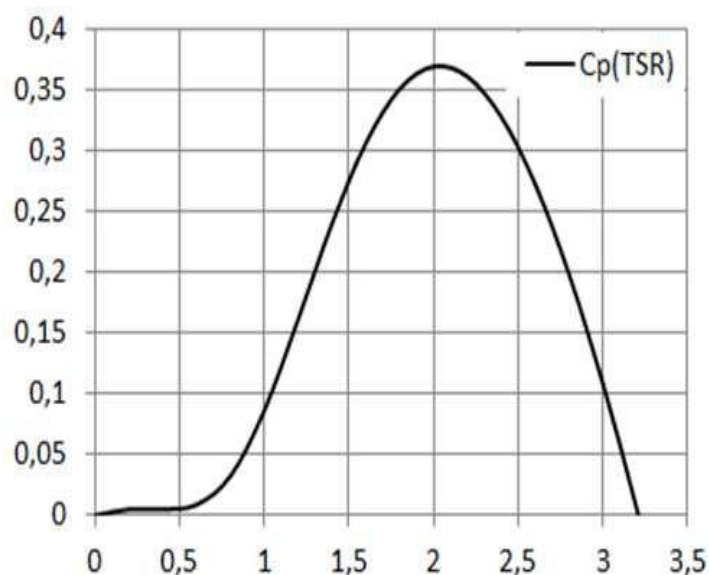


Рисунок 1.3 – График зависимости коэффициента использования энергии ветра C_p от быстроходности Z

Из данного графика видно, что для достижения максимального значения C_p необходимо поддерживать оптимальную быстроходность Z .

Для каждой конструкции ветроколеса со своими геометрическими размерами существует определенное значение быстроходности, при которой ветроколесо обеспечивает наибольшую эффективность [14]

Оптимальная быстроходность достигается путем изменения частоты вращения ротора ветроколеса т.е. регулируя частоту вращения ротора ветроколеса в зависимости от изменяющегося ветра, регулируется аэродинамическая мощность ВЭУ.

Возникает потребность в применении устройства, которое регулировало бы мощность ветро-энергетической установки: ограничивало бы скорость ветро-установки при критических значениях скоростей ветра, увеличивало коэффициент использования энергии ветра до максимального значения на который рассчитан данный тип ВЭУ.

На данный момент существуют регуляторы мощности на основе следующих систем:

- Механических
- электрических,
- электронных
- комбинированных

Использование регулятора мощности на основе механических систем (аэродинамический регулятор) не только ограничивает частоту вращения ротора ветроколеса ветроэнергетической установки, но и способствует уменьшению размеров генератора ветро-энергетической установки, упрощению конструкции электронного регулятора.

Существуют различные типы аэродинамических регуляторов.

Один из типов аэродинамического регулятора изображен на Рисунке 1.4

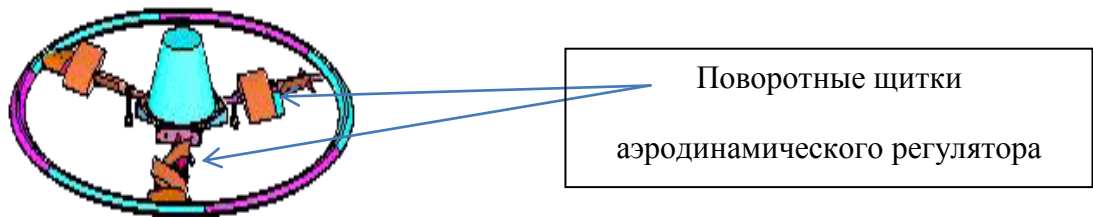


Рисунок 1.4 - Аэродинамический регулятор вертикально–осевой ВЭУ

Аэродинамические регуляторы данного типа состоят из щитков с обтекателями, совершающие поворот вокруг оси траверсы на червячной передаче при возрастании центробежной силы. Таким снижается скорость вращения ветроколеса. Данное изобретение позволило эксплуатировать ВЭУ на скорости ветра более номинальной 11 м/с без применения балластной нагрузки и остановки ротора на буревых ветрах.

Однако такое устройство ограничения частоты вращения ротора имеет большие габариты и массу, а также склонность к нестабильной работе – такие регуляторы расположены на всех траверсах вертикально-осевого ротора и должны активироваться одновременно. Но на практике осуществить это практически невозможно из-за различного коэффициента упругости упорных пружин. Следовательно, если сработает только один регулятор (например, из трех), в роторе возникнет дисбаланс, а это является причиной возникновения вибраций со всеми вытекающими последствиями.

Существуют также ручные и автоматические устройства торможения, в основе которых лежит обычный дисковый или колодочный тормоз, но такие устройства полностью блокируют ротор ВЭУ при больших скоростях ветра, когда выработка энергии может быть максимальной.

Наиболее эффективным является аэродинамический регулятор, работающий по принципу преобразования центробежных сил в поступательное движение кулачков с помощью центробежной муфты.

Конструкция данного типа регулятора изображена на Рисунке 1.5

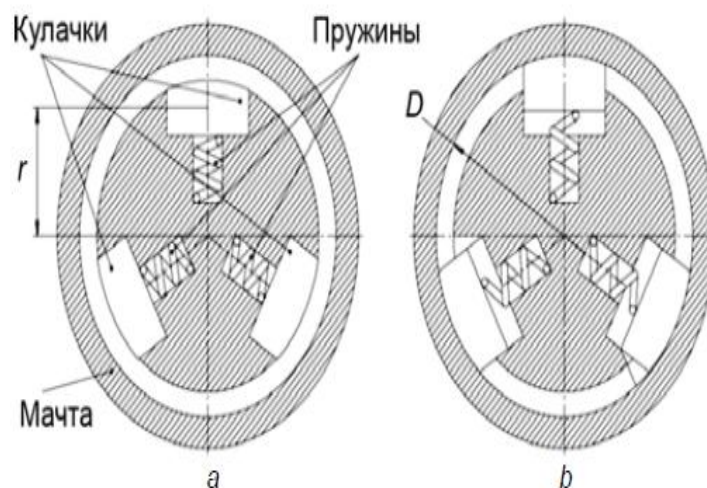


Рисунок 1.5 – Схема устройства торможения

Устройство может применяться как в вертикально-осевых ВЭУ, так и в горизонтально-осевых. Пример рассмотрен для вертикально-осевой конструкции. Для горизонтально-осевых ВЭУ устройство будет аналогичным, с рядом небольших конструктивных изменений в связи с некоторым различием в кинематических схемах передачи крутящего момента.

При разгоне ротора до некоторой частоты вращения кулачки начнут поступательно перемещаться от центра к периферии под действием центробежных сил, растягивая удерживающие их пружины. Как только частота вращения ротора достигнет некоторого предельного (номинального) значения, центробежная сила станет достаточно большой по величине, чтобы прижать кулачки к стенкам мачты или иного ограничителя. В результате контакта поверхностей кулачков с внутренней стенкой ограничителя возникнет фрикционное взаимодействие, за счет которого будет происходить торможение. Чем выше частота вращения ротора, тем сильнее центробежная сила прижимает кулачки к стенкам и тем больше становится тормозящая сила трения.

При снижении частоты вращения ротора центробежная сила снижается, и кулачки под воздействием упругих усилий пружин возвращаются в исходное положение, торможение прекращается, а ротор вновь разгоняется.

На данный момент можно выделить основные способы управления мощностью ветроэнергетической установки (ВЭУ):

- 1) ВЭУ, работающая при постоянной частоте вращения ветроколеса [6];
- 2) ВЭУ, работающая при нескольких фиксированных частотах вращения ветроколеса;
- 3) ВЭУ, работающая при переменной частоте вращения ветроколеса;

1.4.1 Управление мощностью ВЭУ при постоянной частоте вращения ветроколеса.

Данный способ управления является наиболее простым в конструктивном исполнении. Такая ВЭУ состоит из следующих компонентов: ветрогенератора, неуправляемого выпрямителя (трехфазный диодный мост) аккумуляторной батареи, балластной нагрузки.

Структурная схема ВЭУ с постоянной частотой вращения изображена на Рисунке 1.6

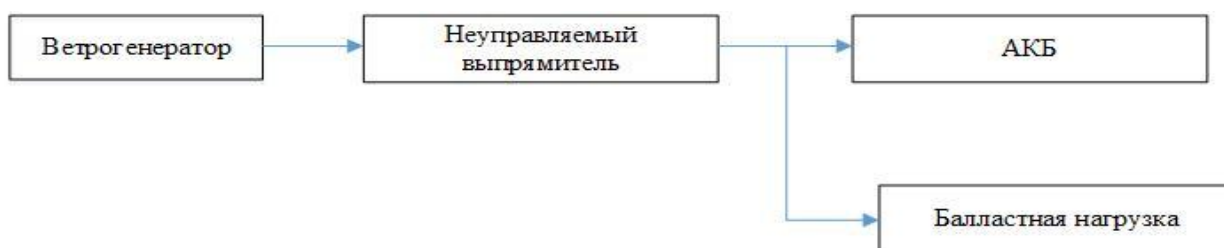


Рисунок 1.6 - Структурная схема ВЭУ с постоянной частотой вращения.

Этот способ управления обладает рядом существенных недостатков:

1) Выработка номинальной мощности только в узких диапазонах скоростях ветра.

Так, например, ветроустановка мощностью 3кВт будет вырабатывать номинальную мощность только при номинальной скорости ветра (по стандартам разных стран мощность ВЭУ определяется на скорости ветра 10.4, 11 или 11.2 метров в секунду) . Так, при уменьшении скорости ветра вырабатываемая мощность ВЭУ уменьшается в корень из трех. (согласно формуле (1)).

Что бы уменьшить скорость ветра, при которой ВЭУ вырабатывает номинальную мощность, необходимо изменить габариты ветроколеса.

Таблица 1 – габариты ветроколеса при различных скоростях ветра

Номинальная скорость ветра, м/сек	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-----------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

Продолжение таблицы 1

Номинальная скорость ветра, м/сек	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Высота ротора, м	6,4	7	2,2	,3	,4			,4	,8	,3
Диаметр ротора, м	2,4	4,5	0,4	,9	,3	,1	,3	,7	,2	,8
Скорость вращения ротора, об/мин		5	5	0	0	5	00	30	60	80

Из таблицы 1 видно, что для уменьшения номинальной скорости ветра необходимо увеличить габариты ветроколеса.

Это приводит к существенным проблемам:

- 1) Возрастает цена на ветрогенератор;
- 2) Увеличиваются требования к средствам защиты ветроустановки от разрушения;

1.4.2 Управление мощностью ВЭУ при нескольких фиксированных частотах вращения ветроколеса

Уменьшить габариты ветрогенератора, увеличив при этом эффективность использования энергии ветра можно с помощью систем управления при нескольких фиксированных частотах вращения ветроколеса.

Есть несколько вариантов реализации данного способа:

- 1) Переключение обмоток статора синхронного генератора

Этот способ реализуется с помощью синхронного генератора с несколькими обмотками (с различным количеством пар полюсов), заложенными в статоре.

В данном способе регулирования используется зависимость частоты вращения ротора от количества пар полюсов обмоток статора. Эта зависимость выражается формулой:

$$n = \frac{60f}{p} \quad (1.1)$$

где f - частота вращения магнитного поля

p - количество пар полюсов обмоток статора

Так, например, при низкой скорости ветра, для поддержания оптимальной быстроходности Z , переключением обмоток статора количество пар полюсов увеличивается и ротор замедляется. При увеличении скорости ветра количество пар полюсов, необходимо, соответственно, уменьшить.

Для переключения обмоток статора используется электромеханический коммутатор.

К достоинствам данного способа управления можно отнести:

- Расширение диапазона эффективного использования ветра;
- простота электрического преобразователя ветроэнергетической установки вследствие использования электромеханического коммутатора обмоток генератора в качестве исполнительного устройства.

Недостатками данного способа управления являются:

- необходимость использования анемометра для определения текущей скорости ветра;
- необходимость применения специальных защитных средств для ограничения мощности генератора при скоростях ветра, превышающих номинальную

2) изменение передаточного отношения механической передачи редуктора (мультипликатора).

Между рабочим колесом и ротором генератора устанавливается редуктор.

Частота вращения вала генератора регулируется за счет изменения передаточного отношения механической передачи.

Преимуществом этого способа является следующее:

- эффективная работа ВЭУ при нескольких фиксированных скоростях ветра; простота электрического преобразователя ВЭУ т.к. функции исполнительного устройства системы управления ВЭУ осуществляет управляемая механическая коробка передач.

К недостаткам можно отнести:

- необходимость применения анемометра для определения текущей скорости ветра; увеличение потери механической энергии передаваемой ветроколесом генератору, что снижает общую эффективность ВЭУ;
- необходимость применения специальных защитных средств для ограничения мощности генератора при скоростях ветра, превышающих

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

номинальную. [Мартьянов А. С. // Исследование алгоритмов управления и разработка контроллера ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения]

1.4.3 Управление мощностью ВЭУ изменением установочного угла лопастей или геометрических размеров ветроколеса

Применение данного способа предполагает использование такой конструкции ветроколеса, в которой возможно автоматическое изменение аэродинамических поверхностей, приводящее к изменению аэродинамических характеристик ветроколеса в соответствии с изменяющейся скоростью ветра [5;7]

Такая конструкция обычно требует оснащение ветроколеса различными агрегатами для осуществления функции управления [8]

Преимущества способа:

- наиболее полное использование энергии ветра в широком диапазоне рабочих скоростей; обеспечивается аэродинамическое регулирование мощности ВЭУ, что создает благоприятные режимы эксплуатации.

Недостатки способа:

- необходимость применения сложной системы управления механическими устройствами и агрегатами для изменения геометрии аэродинамических поверхностей ветроколеса [14];
- снижение надежности конструкции ветроэнергетической установки; увеличение стоимости ветроэнергетической установки и эксплуатационных расходов

1.4.4 Управление мощностью ВЭУ при переменной частоте вращения ветроколеса

Принцип управления мощностью ветро-энергетической установки основан на регулировании частоты вращения ротора ветроколеса таким образом, чтобы достигалось оптимальное значение быстроходности Z при котором коэффициент использования энергии ветра максимален $C_p(Z)$

При переменной скорости вращения ветроколеса генератор будет вырабатывать ток, изменяющийся по амплитуде и частоте.

Для обеспечения корректного функционирования ветроэнергетической установки требуется применение преобразователя электрической энергии [32].

Такой преобразователь должен обеспечивать преобразование переменного электрического тока генератора в постоянный ток заданной величины для обеспечения такого режима работы ВЭУ, чтобы мощность

нагрузки генератора обеспечивала требуемую частоту вращения ветроколеса при заданной скорости ветра. [14]

Преимущества способа:

- эффективность использования ветроэнергетической установки в широком диапазоне скоростей ветра[19];
- простота конструкции ветроэнергетической установки т.к. исполнительным устройством системы управления ВЭУ является электронный преобразователь.
- в условиях чрезмерно высоких скоростей ветра осуществляется защита электрического генератора от перегрузки

Недостатки способа:

- необходимость использования анемометра или определения текущей скорости ветра по косвенным методам;

1.5 Управление мощностью гелио-установок:

1.5.1 С использованием контроллера типа On/Off

Является самым простым методом управления гелио-установкой. Его главный недостаток в том, что при возрастании напряжения на клеммах аккумуляторной батареи до предельного значения полного заряда емкости не происходит. Она доходит в этом случае примерно до 90% номинального значения.

У аккумуляторов постоянно происходит регулярный недобор энергии, который значительно снижает срок их эксплуатации

Контроллер солнечной установки типа On/Off представлен на Рисунке 1.7



Рисунок 1.7 контроллер солнечной установки типа On/Off

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

1.5.2 С использованием контроллера в режиме широтно-импульсных (ШИМ) преобразований

ШИМ-контроллеры выпускаются на основе конструкций микросхем. Их задачей является управление силовым блоком для регулирования напряжения на его входе в заданном диапазоне с помощью сигналов обратной связи.

ШИМ - контроллеры дополнительно могут:

1. учитывать температуру электролита встроенным либо выносным датчиком (последний способ точнее),
2. создавать температурные компенсации зарядным напряжениям,
3. настраиваться под определенный тип аккумуляторов (GEL, AGM, жидко-кислотные) с разными показателями графиков напряжений в одинаковых точках.

Увеличение функций ШИМ-контроллеров повышает их стоимость и надежность работы.

ШИМ-контроллер производит заряд аккумуляторной батареи на 100% её ёмкости, что дает значительное преимущество перед контроллером типа On/Off. Это достигается тем, что когда напряжения заряда аккумулятора достигает максимума, контроллер не прекращает заряд, а плавно снижает зарядный ток.

Графики напряжения и тока при различных стадиях заряда батареи представлен на Рисунке 1.8

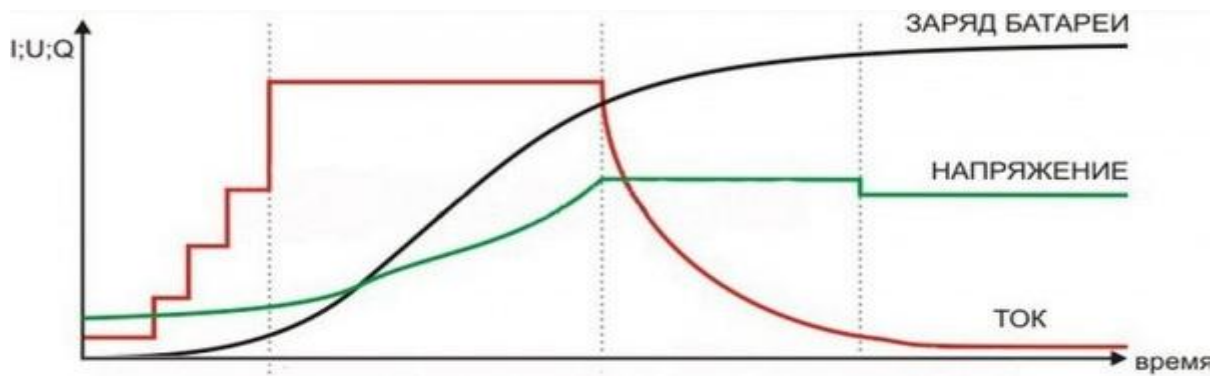


Рисунок 1.8 - Графики напряжения и тока при различных стадиях заряда батареи

Достоинства:

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

- Низкая стоимость. Последовательные модели: позволяют использовать одновременно различные источники энергии и создают низкий нагрев во время регулирования;
- Шунтовые модели: незначительные потери мощности в процессе работы, слабые электромагнитные помехи и низкий уровень падения напряжения в ключах.

1.5.3 С использованием контроллера в режиме сканирования точки максимальной мощности (MPPT)

Такие контролеры обозначают английской аббревиатурой MPPT. В основе работы MPPT-контроллера, так же как и у ШИМ-контроллера используется широтно-импульсный преобразователь. Но MPPT-контроллер очень точен т.к. учитывает наибольшее значение мощности, которую способна отдать солнечная панель. Это значение всегда точно определяется и вносится в документацию.

MPPT-контроллер проводит периодически полное сканирование вольт-амперной характеристики солнечной батареи, находит точку максимальной мощности, до следующего сканирования контроллер изменяет точку рабочего напряжения, сравнивает полученную мощность с предыдущей, сдвигает рабочую точку напряжения если при этом значении мощность увеличилась.

Принцип работы MPPT-контроллера показан на Рисунке

MPPT-контроллер наиболее лучше использует ресурс солнечных батарей чем ШИМ-контроллер.

Например, для гелиобатарей 12 В точка отдачи максимальной мощности составляет порядка 17,5 В. Обыкновенный ШИМ контроллер прекратит заряд аккумуляторной батареи при достижении напряжения 14 - 14,5 В, а работающий по технологии MPPT — позволит дополнительно использовать ресурс солнечных батарей до 17,5 В.

С увеличением глубины разряда аккумуляторов возрастают потери энергии от источника. MPPT контроллеры уменьшают их.

Принцип работы MPPT-контроллера представлен на Рисунке 1.9

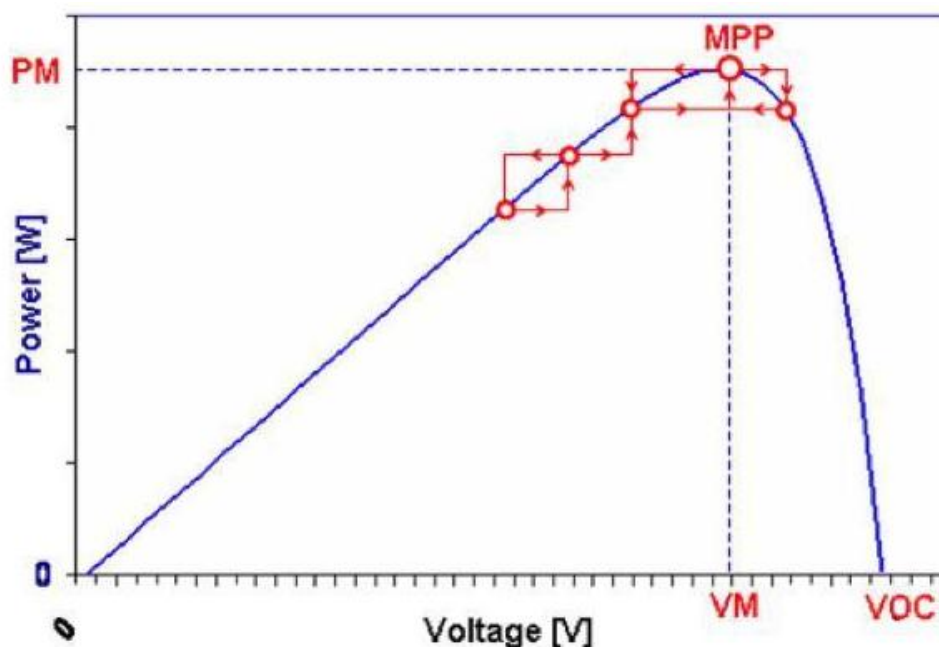


Рисунок 1.9 - Принцип работы MPPT-контроллера

MPPT контроллеры, используя широтно-импульсные преобразования во всех циклах заряда аккумуляторов, увеличивают отдачу солнечной батареи. В зависимости от разных факторов экономия может составлять 10 - 30%. При этом ток выхода из аккумулятора будет превышать ток входа в него из солнечной батареи.

1.6 Выводы по главе

В данной главе был произведен обзор ветро-энергетики и гелио-энергетики. Рассмотрены вопросы по управлению мощностью ветро-энергетической установки и гелио-установки. Можно сделать вывод, что наиболее простым и малоэффективным способом управления ВЭУ является работа при постоянной частоте вращения ветроколеса. Такая установка работает только в узких диапазонах скоростей ветра. Наиболее эффективным способом управления ВЭУ является режим работы при переменной скорости вращения.

Наиболее эффективным способом управления гелио-установкой является способ с использованием контроллера в режиме сканирования точки максимальной мощности (MPPT).

Для эффективного управления гибридной ветро-солнечной установкой необходим регулятор мощности.

2 РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ВЕТРО-СОЛНЕЧНОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Компьютерная модель – метод изучения объекта-оригинала, основанный на математическом моделировании.

Математическая модель отображает основные свойства исследуемого объекта с помощью системы математических соотношений (формул, уравнений, неравенств). Незначительные характеристики и параметры объекта-оригинала на стадии создания модели не учитываются.

На стадии проектирования сложных систем управления использование методов имитационного моделирования позволяет значительно уменьшить затраты на разработку, исследование и испытания, уменьшить время разработки изделия, достичь повышения эффективности процесса разработки и проектирования систем управления сложными объектами.

В качестве среды разработки и исследования выбран пакет программ для математических расчетов MATLAB/Simulink от компании Mathworks Inc, широко распространенный как в научной среде, так и в различных проектных организациях [80]

Simulink—это подсистема пакета Matlab, предназначенная для имитационного моделирования динамических систем с помощью принципа визуального программирования. Имитационная модель может быть создана как из готовых блоков библиотеки, так и из блоков, созданных самим пользователем.

Интерактивная среда Simulink, позволяет использовать уже готовые библиотеки блоков для моделирования электросиловых, механических и гидравлических систем, а также применять развитый модельно-ориентированный подход при разработке систем управления, средств цифровой связи и устройств реального времени.

Функциональная схема имитационной модели гибридного ветро-солнечного энергокомплекса представлена на Рисунке 2.1

Ветро-солнечная установка малой мощности состоит из следующих основных элементов:

- 1) Ветродвигатель
- 2) Генератор
- 3) Регулятор мощности
- 4) Аккумуляторная батарея
- 5) Солнечная панель
- 6) Инвертор

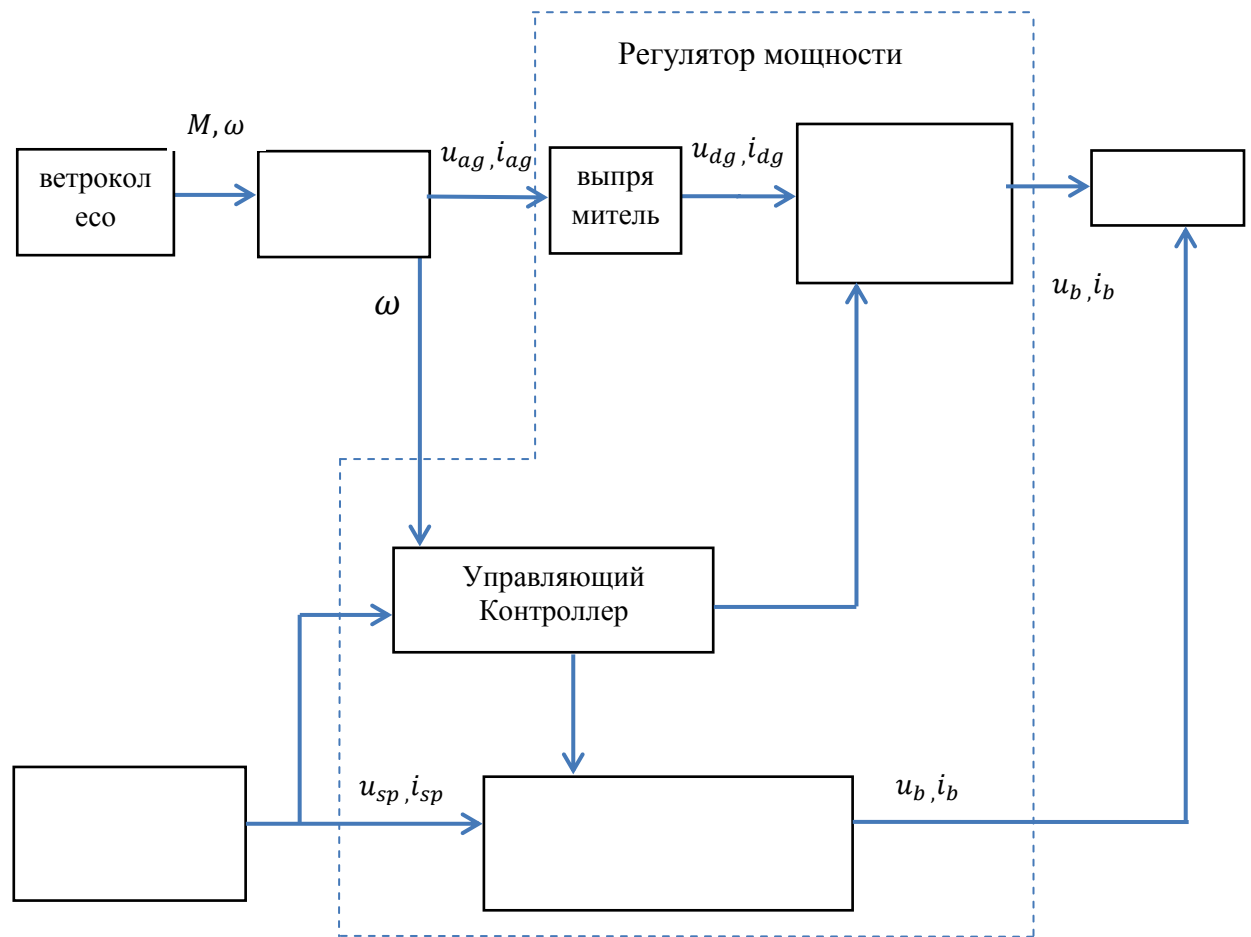


Рисунок 2.1 — Функциональная схема имитационной модели гибридного ветро-солнечного энергокомплекса

Ветродвижитель – устройство, преобразующее кинетическую энергию поступательно движущегося воздушного потока в механическую энергию вращения вала.

Рабочим органом ветродвижателя является ветроколесо, приводимое в движение ветром и жестко связанное с валом, вращение которого приводит в действие оборудование, выполняющее полезную работу.

Электрический генератор — электрическая машина, преобразующая механическую энергию вращения вала в электрическую энергию.

Для ветроэнергетических установок могут быть использованы генераторы разных типов: генераторы постоянного и переменного тока, асинхронные и синхронные (вентильные) генераторы, с постоянными магнитами и с электромагнитным возбуждением и другие. Тип генератора определяется разработчиком ветроэнергетической установки и выбирается из условий эксплуатации, требований к мощности и качеству генерируемой электрической энергии [14]

Инвертор — устройство, преобразующее напряжение постоянного тока в напряжение переменного тока. Аккумуляторные батареи являются источником напряжения постоянного тока, а большинство потребителей электроэнергии напротив рассчитаны на переменное напряжение 220 или 380В при частоте 50Гц. Часто инверторы объединяют несколько функций: преобразуют постоянный ток в переменный, являются контроллерами заряда; обеспечивают защиту аккумуляторной батареи от перезаряда и переразряда; выполняют роль балластной нагрузки для генератора.

Существуют 2 типа инверторов, отличающихся по качеству переменного тока: с синусоидальным выходным напряжением и, так называемой, «модифицированной синусоидой». Первые отличаются более высокой стоимостью, но позволяют питать любые нагрузки, чувствительные к качеству электроэнергии. Вторые отличаются меньшей стоимостью, но не предназначены для питания индуктивной нагрузки: устройства с электродвигателями и трансформаторами.

Солнечная панель (она же солнечная батарея) – это устройство преобразующее энергию солнечного излучения в постоянный электрический ток.

Конструктивно солнечная панель состоит из соединенных между собой фотоэлектрических преобразователей, расположенных в защитном корпусе со стеклянной передней панелью. Фотоячейки являются ничем иным, как полупроводниковыми модулями, в которых под действием лучей солнца генерируется электроток.

Аккумуляторная батарея — устройство, предназначенные для накопления электроэнергии. В системах, основанных на возобновляемых источниках энергии, как правило, применяются свинцово-кислотные необслуживаемые аккумуляторные батареи типа AGM – с абсорбированным электролитом. Такие батареи способны к достаточно глубокому разряду без потери качества и рассчитаны на большое количество циклов заряда/разряда.

Регулятор мощности ветро-солнечного энергокомплекса – устройство, предназначенное для выполнения следующих функций:

- преобразование 3-х фазного выходного напряжения генератора переменного тока в ток заряда аккумуляторной батареи.
- регулирование тока заряда аккумуляторной батареи по разработанному алгоритму
- управление электромагнитным моментом генератора ВЭУ
- выдачу сигнала для разблокировки аварийного тормоза
- регулирование тока заряда аккумуляторной батареи по разработанному алгоритму

Регулятор мощности состоит из трехфазного мостового выпрямителя, электронного преобразователя ВЭУ, электронного преобразователя солнечной панели, управляющего контроллера.

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

2.1 Модель ветроколеса в MATLAB/Simulink

Секундная кинетическая энергия воздушного потока, ометающего ветроколесо выражается формулой:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (2.1)$$

где m – секундная масса воздуха, протекающего через ветроколесо;

v – скорость ветра;

Масса воздуха определяется по формуле:

$$m = \rho \cdot S \cdot v, \quad (2.2)$$

где ρ – плотность воздуха, равная для нормальных условий $1,23 \text{ кг/м}^3$ (при $t = 15^\circ\text{C}$ и $p = 101,3 \text{ кПа}$);

S – площадь ометаемой поверхности ветроколеса

для крыльчатого ветроколеса площадь определяется по формуле:

$$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (2.3)$$

где D – диаметр ветроколеса.

для вертикально-осевого ветроколеса площадь определяется по формуле:

$$S = D \cdot H, \quad (2.4)$$

где H – высота ветроколеса.

Подставив (2.2) в (2.1) получим:

$$E_k = P_v = \frac{\rho \cdot v^3 \cdot S}{2} \quad (2.5)$$

Из формулы видно, что секундная энергия ветра или мощность воздушного потока изменяется пропорционально его плотности, площади ометаемой поверхности и кубу скорости ветра.

Часть полной энергии потока, воспринятой ветроколесом, которую ветродвигатель преобразует в аэродинамическую механическую энергию

P_a , оценивается коэффициентом использования энергии ветра (КИЭВ)
 C_p

$$C_p(Z) = \frac{P_a}{P_v}, \quad (2.6)$$

где Z – быстроходность ветроколеса, определяется формулой

$$Z = \frac{\omega \cdot R_{БК}}{v}, \quad (2.7)$$

где $R_{БК}$ - радиус ветроколеса

Коэффициент использования энергии ветра зависит от быстроходности, поэтому быстроходность является важнейшей характеристикой ветроколеса. Зная $C_p(Z)$ можно определить аэродинамическую мощность ветроколеса.

$$P_a = C_p(Z) \cdot \frac{\rho \cdot v^3 \cdot S}{2} \quad (2.8)$$

Вращательное движение ветроколеса ВЭУ описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_a - M_{эм} - k_{тр} \cdot \omega, \quad (2.9)$$

где J – приведенный момент инерции вращающихся частей ветроколеса;

ω – угловая частота вращения ветроколеса;

M_a – аэродинамический момент ветроколеса;

$M_{эм}$ – электромагнитный момент генератора;

$k_{тр}$ – коэффициент трения;

t – время.

Аэродинамический момент можно выразить из формулы:

$$P_a = M_a \cdot \omega \quad (2.10)$$

$$M_a = C_p(Z) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2}, \quad (2.11)$$

где $C_p(Z)$ - коэффициент использования энергии ветра КИЭВ;

S – площадь ометаемой поверхности ветроколеса

ρ - плотность воздуха;

V - скорость ветра.

Для исследуемого вертикально-осевого ветроколеса зависимость C_p от быстроходности находится по формуле:

$$C_p = \left(\frac{c_1}{Z} - c_2 \right) \cdot e^{-\frac{c_3}{Z}} + c_4 \quad (2.13)$$

где $c_1 - c_4$ коэффициенты для заданной конструкции ветроколеса.

Используя математическое описание ветроколеса, в программе MATLAB/Simulink с помощью блока MATLAB Function можно получить модель ветроколеса. В открытом окне редактора (Editor) этого блока пишется необходимая функция на языке Matlab:

```
function [M, P, Cp, Z] = Vetrokoleso3(Vv, Vg, S, R)

%расчет
if Vv>10
    Vv=10;
end
if Vg>32
    Vg=32;
end
Z=Vg/Vv;
a=1/Z;
Cp= ((20*a-5)*exp(-(5*a))+0.0068);
P = 0.5*Cp*1.2*S*(Vv^3);
M=P*R/(Vg);
```

Рисунок 2.2 – программа ветроколеса в MATLAB Function

После закрытия окна редактора формируется блок с определенным количеством входов и выходов.

В данном случае на вход подаются четыре значения: скорость ветра V_v , скорость генератора V_g , радиус ветроколеса R , площадь ометаемой поверхности ветроколеса S , а выходными значениями блока являются: механическая мощность ветроколеса P , момент ветроколеса M , коэффициент использования энергии ветра C_p , быстроходность ветроколеса Z .

С помощью полученной в MATLAB/Simulink модели видно, что коэффициент использования энергии ветра максимален $C_p = 0,41$ при

значении быстроходности, равном $Z=2,4$.

Модель ветроколеса вертикально-осевой ветроустановки типа ВЭУ-3(6) в MATLAB/Simulink представлена на Рисунке 2.3

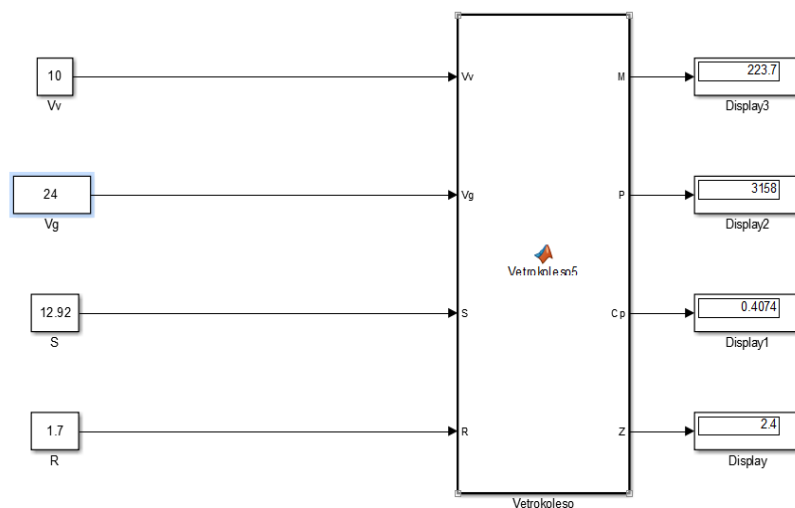


Рисунок 2.3 - Модель ветроколеса в MATLAB/Simulink

По полученным данным получаем график зависимости коэффициента использования энергии ветра C_p от быстроходности Z :

График зависимости коэффициента использования энергии ветра C_p от быстроходности Z в MATLAB/Simulink изображен на Рисунке 2.4

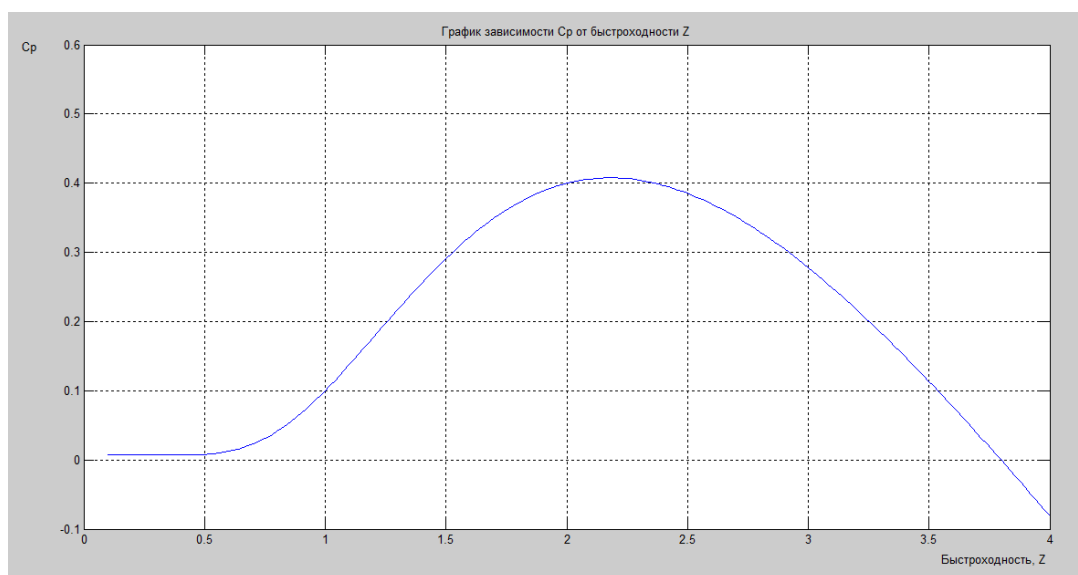


Рисунок 2.4 - График зависимости коэффициента использования энергии ветра C_p от быстроходности Z в MATLAB/Simulink

Графики зависимости мощности ветроколеса от его линейной скорости

при различных скоростях ветра представлен на Рисунке 2.5

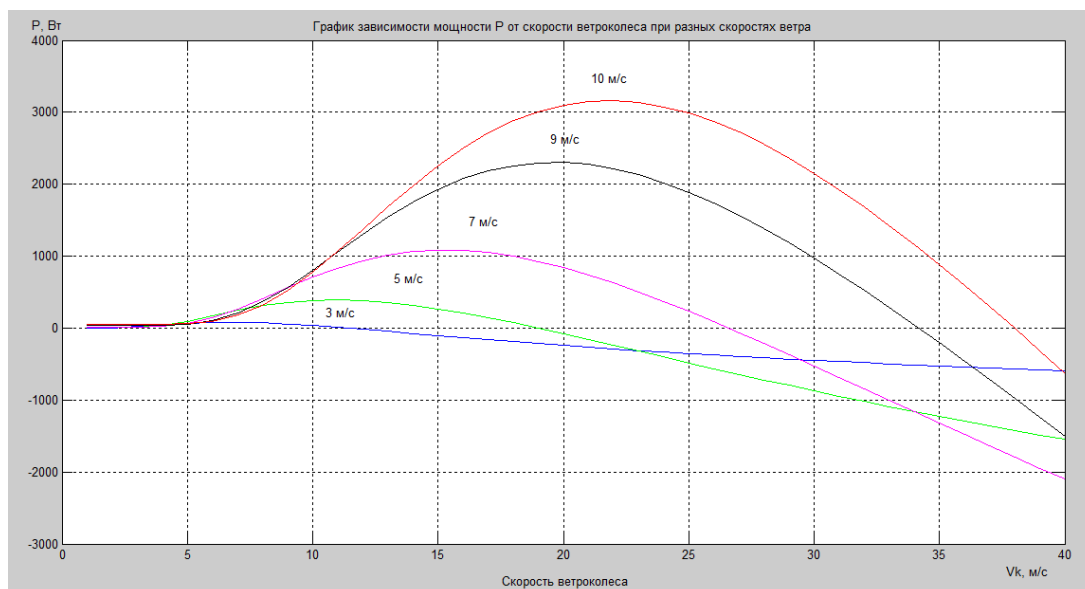


Рисунок 2.5 - График зависимости мощности ветроколеса от его линейной скорости при различных скоростях ветра

Из полученных графиков видно, что ветроколесо вырабатывает максимальную мощность при скорости ветра равной 10 м/с.

2.2 Модель солнечного модуля MATLAB/Simulink

Солнечный модуль проектируется из солнечных батарей. Солнечная батарея в свою очередь состоит из фотоэлектрических элементов, которые могут быть соединены последовательно и / параллельно. Поэтому основной задачей при моделировании солнечного модуля является моделирование фотоэлектрического элемента.

Схема замещения фотоэлектрического элемента представлена на рисунке и состоит из генератора фототока, шунтирующего и последовательного сопротивления, диода.

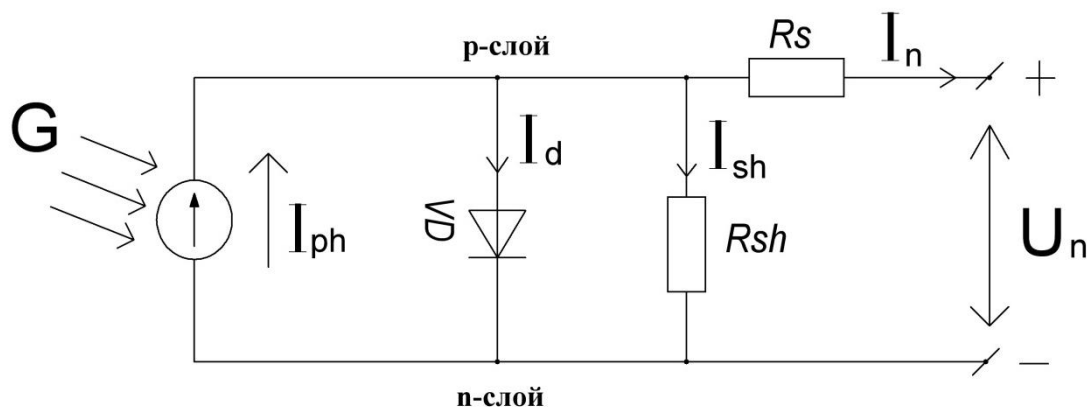


Рисунок 2.6 – Классическая эквивалентная схема замещения солнечного элемента

Ток нагрузки можно определить по следующей формуле:

$$I_c = I_{ph} - I_d - I_{sh}, \text{ A} \quad (2.14)$$

где I_n – ток нагрузки;

I_{ph} – фототок;

I_{sh} – ток, протекающий через шунтирующее сопротивление $R_{ш}$

I_d – ток диода

Выразив величины токов через физические параметры фотоэлектрической панели, получим аналитическое выражение вольт-амперной характеристики в следующем виде:

$$I_n = I_{ph} - I_s \left(\exp \left[\frac{e \cdot (U_n + I_n \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right) - \frac{U_n + I_n R_s}{R_{sh}} \quad (2.15)$$

где I_s – обратный ток насыщения диода, А;

e – заряд электрона ($1,602 \times 10^{-19}$ Кл);

k – постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К);

n – параметр вольт-амперной характеристики фото-электрической панели, называемый диодным коэффициентом;

T – абсолютная температура солнечного элемента, К;

U_n – выходное напряжение;

R_{sh} – шунтирующее сопротивление фотоэлектрического элемента;

R_s – последовательное сопротивление фотоэлектрического элемента;

Так как последовательное сопротивление R_s гораздо меньше шунтирующего сопротивления R_{sh} , то его можно не учитывать и уравнение

(2.15) приобретает вид:

$$I_n = I_{ph} - I_s \left(\exp \left[\frac{e(U_n + I_n \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right) \quad (2.16)$$

Эквивалентная схема солнечного элемента без шунтирующего R_{sh} сопротивления представлена на рисунке

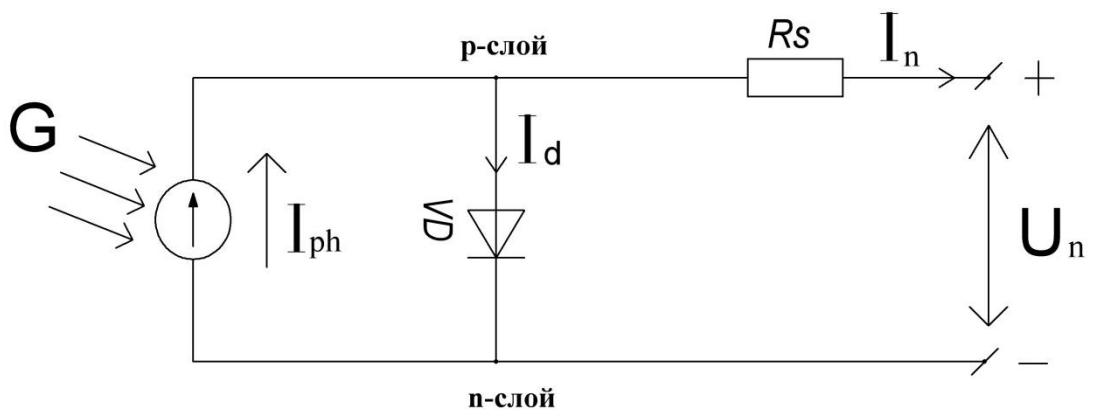


Рисунок 2.7 - Эквивалентная схема солнечного элемента без шунтирующего сопротивления R_{sh}

Переход от модели солнечного элемента к модели солнечной батареи осуществляется с помощью следующих формул :

$$I_{sc}^B = N_p \times I_{sc}, \quad (2.17)$$

$$U_{oc}^B = N_s \times U_{oc}, \quad (2.18)$$

$$R_s^B = \frac{N_s}{N_p} \times R_s \quad (2.19)$$

где N_p - количество параллельно включенных солнечных элементов;
 N_s - количество последовательно включенных солнечных элементов.

Переход от модели солнечной батареи к модели солнечного модуля осуществляется с помощью следующих формул :

$$I_{sc}^M = N_p^B \times I_{sc}^B; \quad (2.20)$$

$$U_{oc}^M = N_s^B \times U_{oc}^B; \quad (2.21)$$

$$R_s^M = \frac{N_p^B}{N_s^B} \times R_s^B. \quad (2.22)$$

где N_p^B - количество параллельно включенных солнечных батарей;
 N_s^B - количество последовательно включенных солнечных батарей.

Значение фототока при эталонной температуре $I_{ph}(T_{ref})$ находится по формуле:

$$I_{ph}(T_{ref}) = I_{sc}(T_{ref}) \times \frac{G}{G_{ref}} \quad (2.23)$$

где T_{ref} - эталонная температура;

G - инсоляция в данный период времени;

G_{ref} - эталонная инсоляция;

Зависимость фототока от изменяющейся температуры окружающей среды определяется по формуле:

$$I_{ph} = I_{ph}(T_{ref}) + \alpha(T - T_{ref}) \quad (2.24)$$

где α - температурный коэффициент тока короткого замыкания

Значение тока I_s при значении температуры в данный период времени определяется по формуле:

$$I_s = I_s(T_{ref}) \times \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} \times e^{\left(\frac{q \cdot V_g(T_{ref})}{n \cdot K \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \right)} \quad (2.25)$$

где V_g – энергия запрещенной зоны полупроводника
ток насыщения при эталонной температуре определяется по формуле:

$$I_s(T_{ref}) = \frac{I_{sc}(T_{ref})}{e^{\left(\frac{q \cdot U_{oc}(T_{ref})}{n \cdot k \cdot T_{ref}} - 1 \right)}} \quad (2.26)$$

Последовательное сопротивление одного солнечного элемента определяется из формулы:

$$R_s = \frac{U_{oc}(T_{ref})}{I_{sc}(T_{ref})} - \frac{P_{max}(T_{ref})}{FF_0 \times (I_{sc}(T_{ref}))^2} \quad (2.27)$$

где FF_0 - эталонный коэффициент заполнения
эталонный коэффициент заполнения находится по формуле:

$$FF_0 = \frac{u_{oc} - \ln(u_{oc} + 0,72)}{1 + u_{oc}} \quad (2.28)$$

где $u_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_T}$

Модель солнечной панели в Matlab/Simulink представлена на Рисунке
Входными параметрами солнечной панели являются:

- температура окружающей среды T_c
- ток короткого замыкания $I_{sc_Tref_M}$
- напряжение холостого хода $V_{oc_Tref_M}$
- максимальная мощность $P_{max_Tref_M}$
- диодный коэффициент n
- количество последовательно включенных солнечных элементов N_s
- количество параллельно включенных солнечных элементов N_p
- количество модулей N_m
- освещенность G

Модель солнечного модуля в Matlab/Simulink представлен на Рисунке 2.7

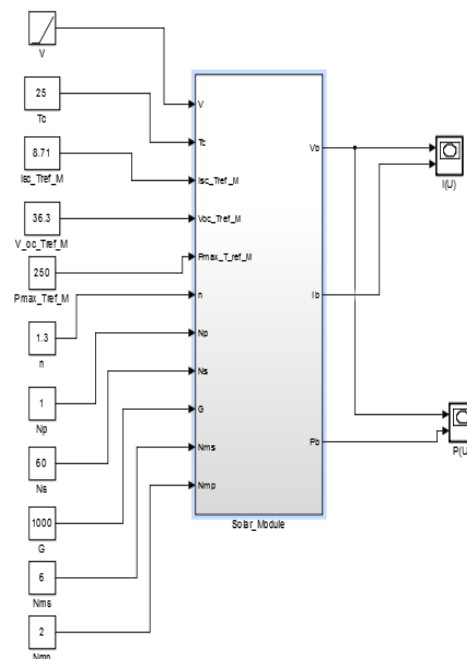


Рисунок 2.8 - Блок солнечного модуля в Matlab/Simulink

Блок Solar_Module состоит из следующих компонентов

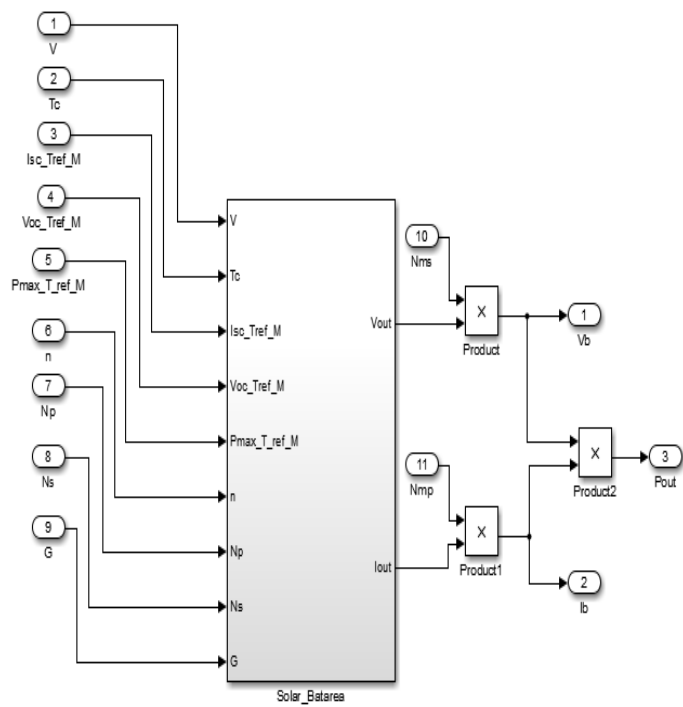


Рисунок 2.9 – Подсистема блока Solar_Module

Подсистема блока Solar_Batarea представлена на Рисунке 2.10

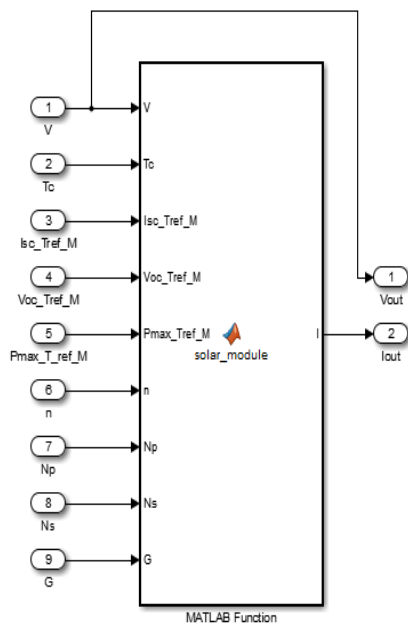


Рисунок 2.10 - Подсистема блока Solar_Batarea

Программа функции солнечного элемента на языке MATLAB представлена на Рисунке 2.11

```

1 function I = solar_module(V, Tc, Isc_Tref_M, Voc_Tref_M, Pmax_Tref_M, n, Ns, Nr)
2
3 %КОНСТАНТЫ
4 k = 1.38e-23;
5 q = 1.60e-19;
6 Tref = 25 +273;
7 Gref = 1000;
8 T = Tc + 273;
9 a=6e-3;
10 Vg=1.12;
11 D=0;

```

Рисунок 2.11 - Программа функции солнечного элемента в Matlab/Simulink

Рассмотрим полученную модель на примере батареи типа CHN250-60P со следующими данными:

- ток короткого замыкания батареи $I_{sc}=8,71$ А;
- напряжение холостого хода одной батареи $U_{oc} = 36,3$ В;
- номинальная мощность одной батареи $P=250$ Вт;
- количество последовательно соединенных батарей – 6 шт.
- количество параллельно соединенных батарей – 2 шт.
- количество последовательных элементов в каждой батарее $N_s=60$;
- количество параллельных элементов в каждой батарее $N_r = 1$;
- солнечное излучение $G=1000$ ватт/м²
- температура $t=25$ С;

С помощью модели солнечного модуля получим вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики при различных значениях солнечного излучения и температуры окружающей среды.

1) Температура окружающей среды постоянна и равна $t=25$ С;

Изменяем значение солнечного излучения:

Вольт-амперная характеристика солнечного модуля при значении солнечного излучения $G=1000$ ватт/м² представлена на Рисунке 2.12

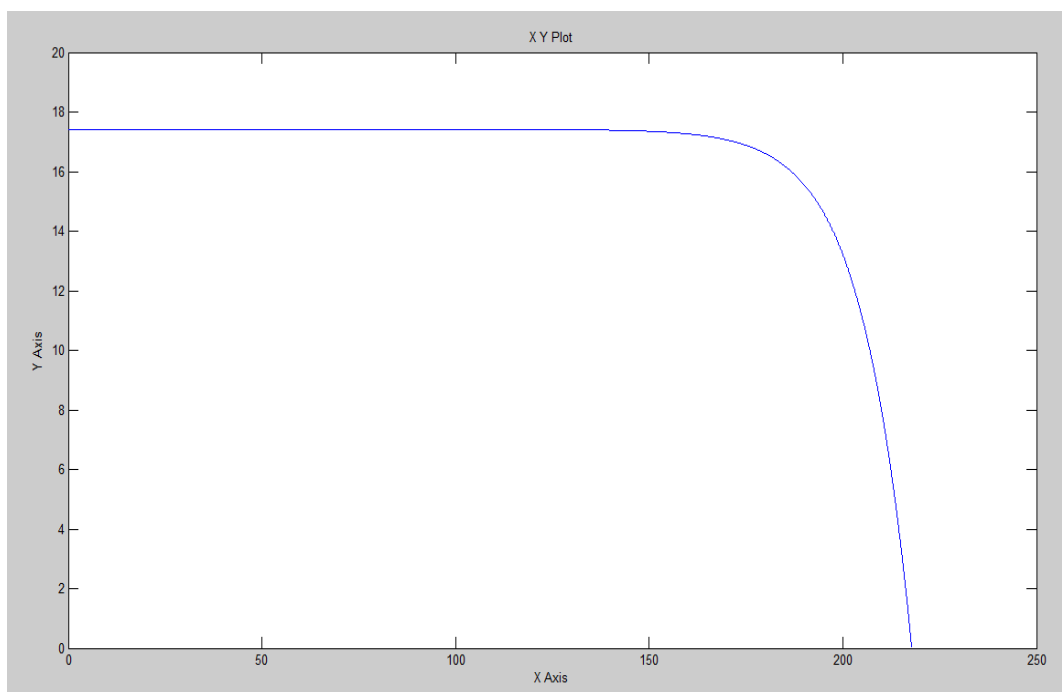


Рисунок 2.12 - Вольт-амперная характеристика солнечного модуля при значении солнечного излучения $G=1000$ ватт/м²

Вольт-ваттная характеристика солнечного модуля при значении солнечного излучения $G=1000$ ватт/м² представлена на Рисунке 2.13

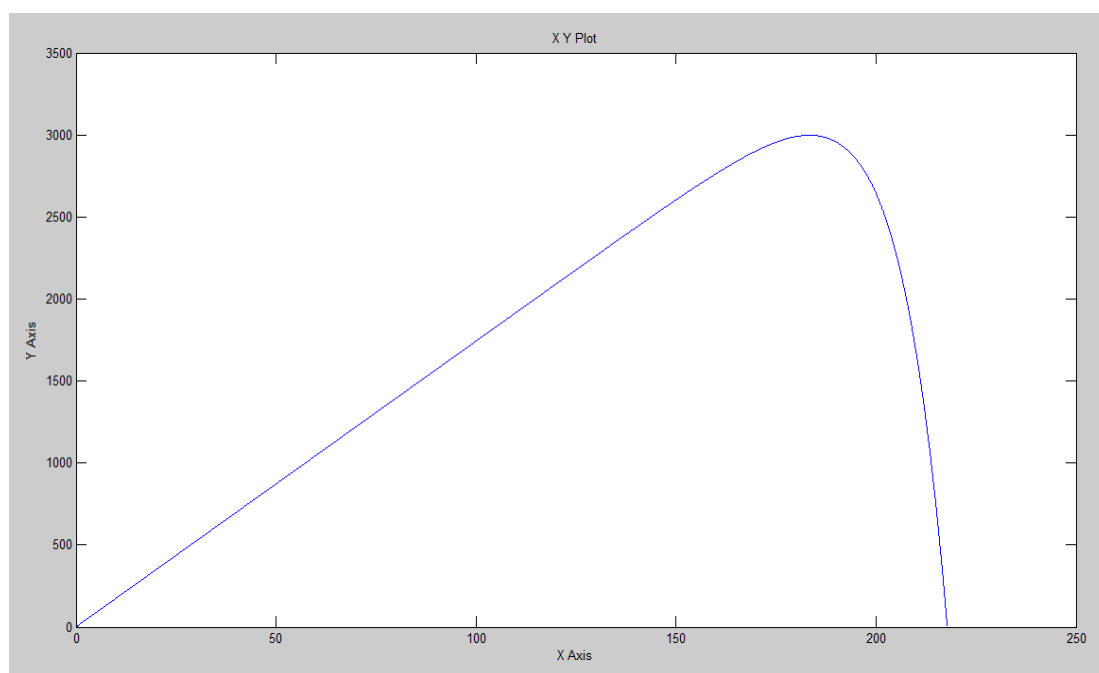


Рисунок 2.13 - Вольт-ваттная характеристика солнечного модуля при значении солнечного излучения $G=1000$ ватт/м²

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

130402.2019.572.11.00 ПЗ

Лист

43

Вольт-амперная характеристика солнечного модуля при значении солнечного излучения $G=800$ ватт/м² представлена на Рисунке 2.14

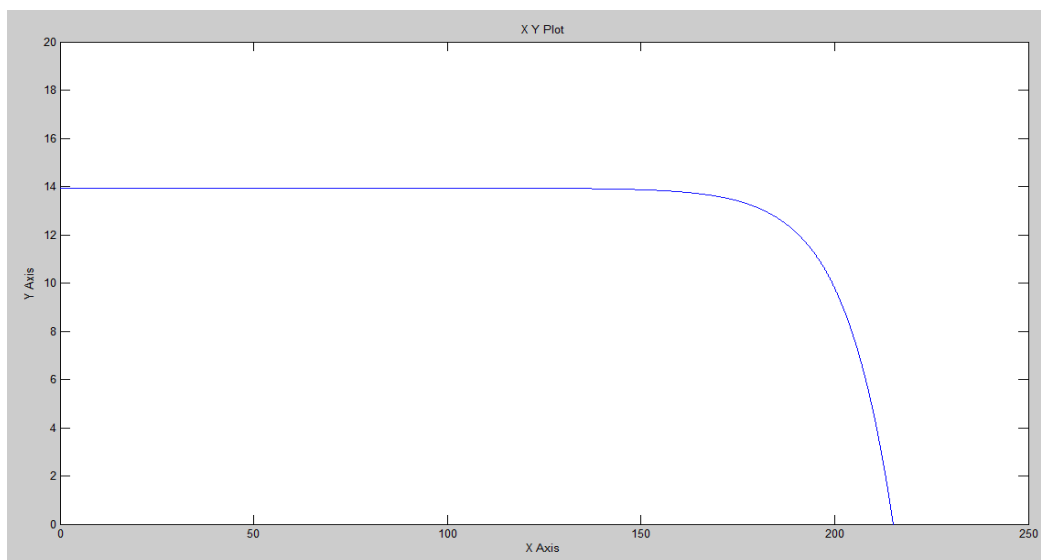


Рисунок 2.14 - Вольт-амперная характеристика солнечного модуля при значении солнечного излучения $G=800$ ватт/м²

Вольт-ваттная характеристика солнечного модуля при значении солнечного излучения $G=800$ ватт/м² представлена на Рисунке 2.15

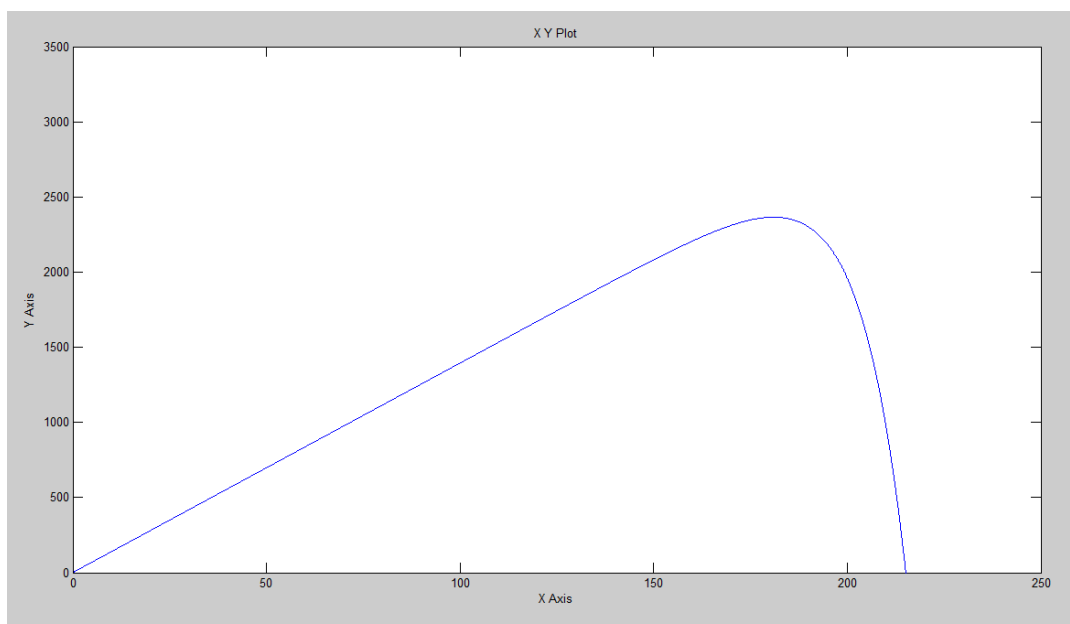


Рисунок 2.15 - Вольт-ваттная характеристика солнечного модуля при значении солнечного излучения $G=800$ ватт/м²

Вольт-амперная характеристика солнечного модуля при значении солнечного излучения $G=600$ ватт/м² представлена на Рисунке 2.16

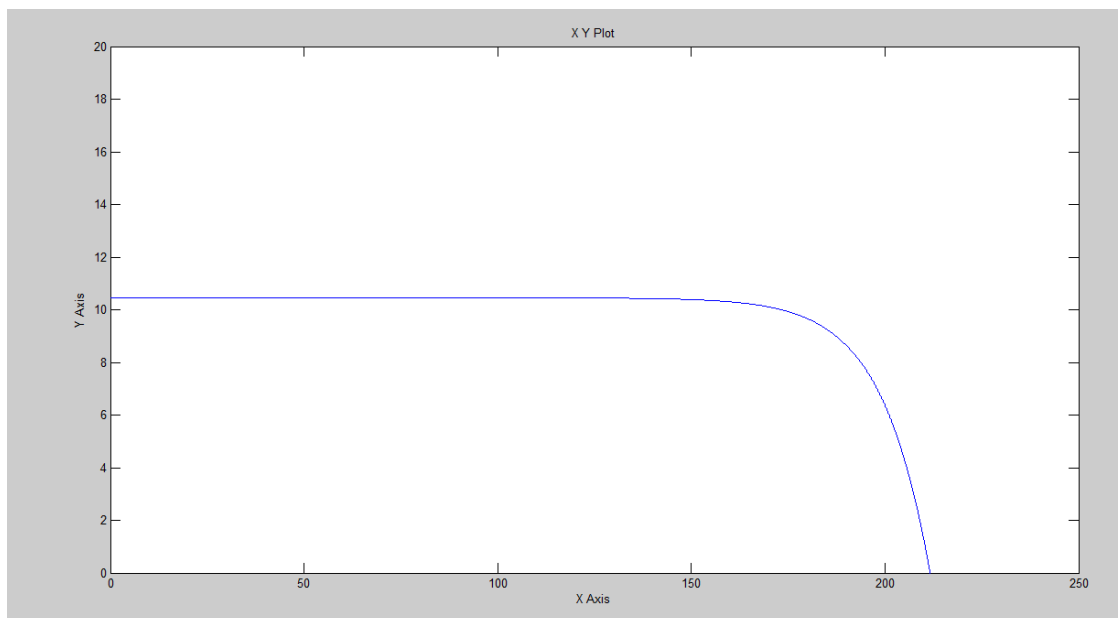


Рисунок 2.16 - Вольт-амперная характеристика солнечного модуля при значении солнечного излучения $G=600$ ватт/м²

Вольт-ваттная характеристика солнечного модуля при значении солнечного излучения $G=600$ ватт/м² представлена на Рисунке 2.17

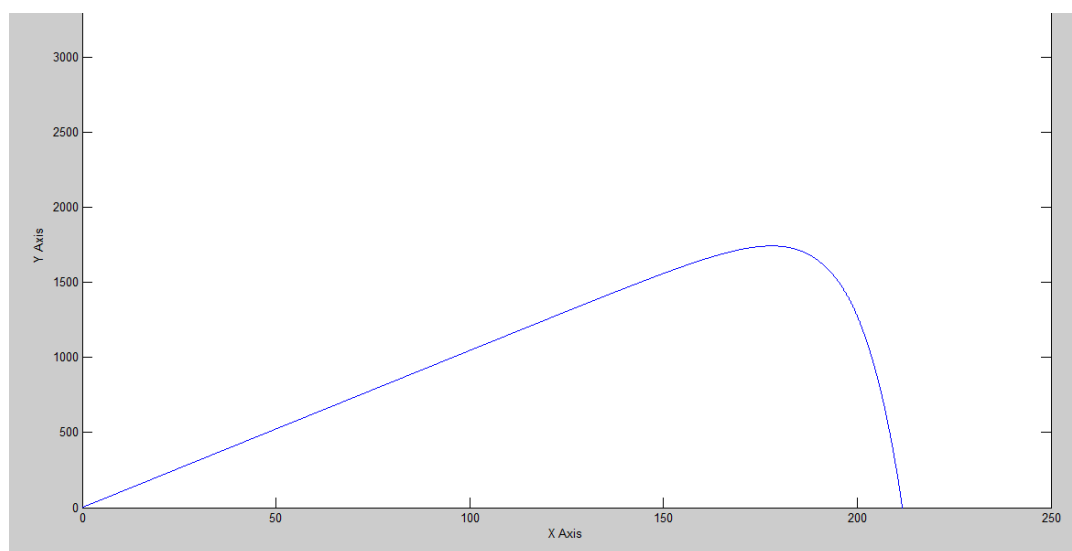


Рисунок 2.17 - Вольт-ваттная характеристика солнечного модуля при значении солнечного излучения $G=600$ ватт/м²

- 2) солнечное излучение $G=1000$ ватт/м²
Изменяем значение температуры окружающей среды

Вольт-амперная характеристика солнечного модуля при значении температуры окружающей среды $t=20\text{ C}^0$ представлена на Рисунке 2.18

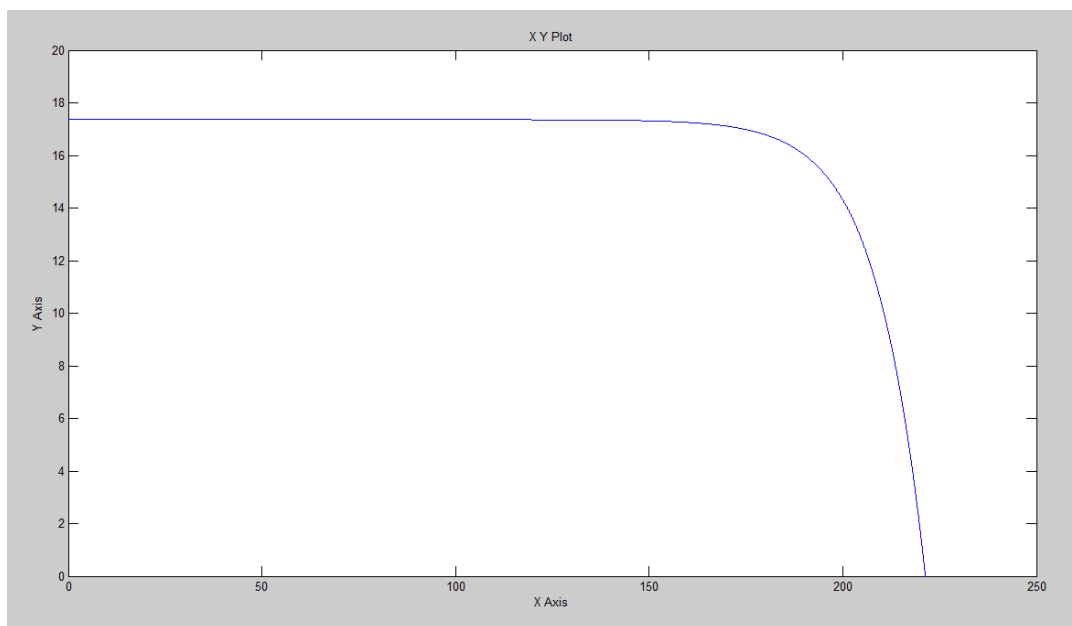


Рисунок 2.18 - Вольт-амперная характеристика солнечного модуля при значении температуры окружающей среды $t=20\text{ C}^0$

Вольт-ваттная характеристика солнечного модуля при значении температуры окружающей среды $t=20\text{ C}^0$ представлена на Рисунке 2.19

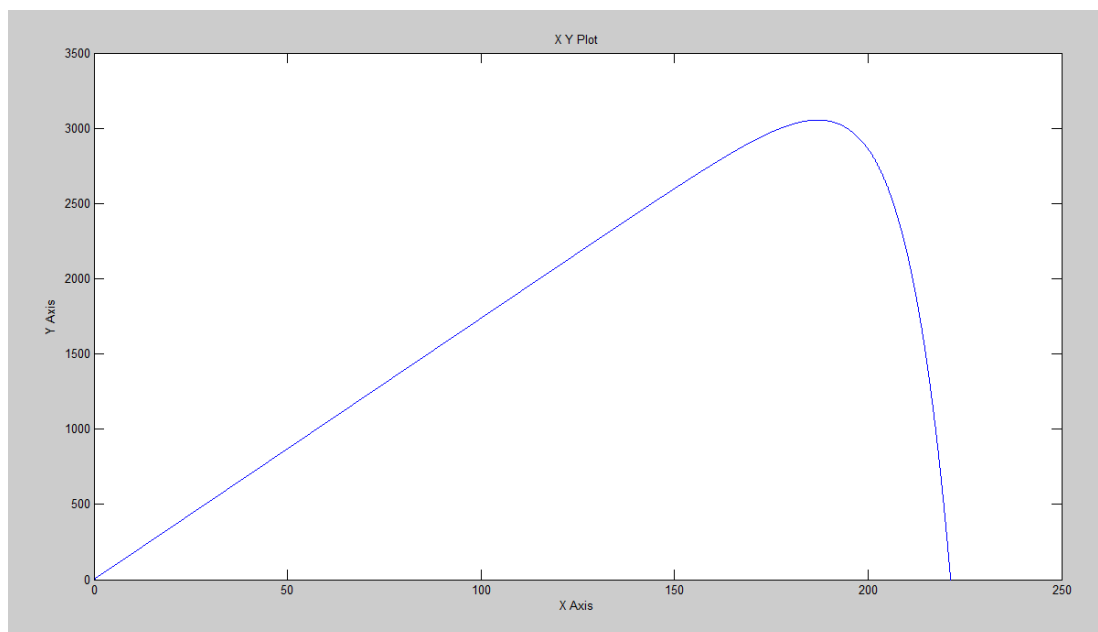


Рисунок 2.19 - Вольт-ваттная характеристика солнечного модуля при значении температуры окружающей среды $t=20\text{ C}^0$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

130402.2019.572.11.00 ПЗ

Лист

46

Вольт-амперная характеристика солнечного модуля при значении температуры окружающей среды $t=15\text{ C}^0$ представлена на Рисунке 2.20

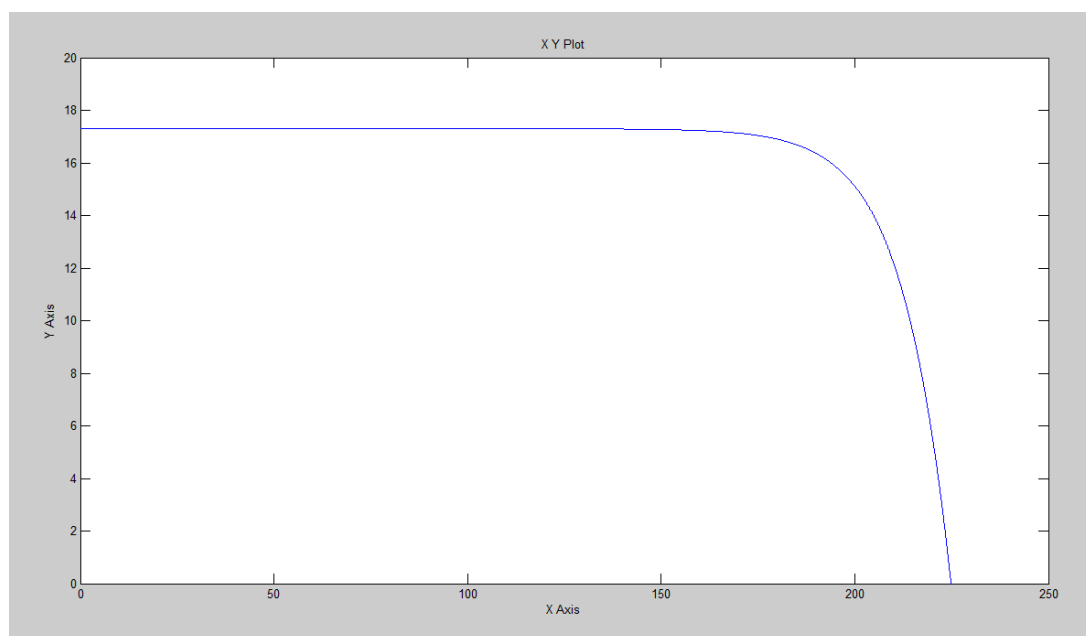


Рисунок 2.20 - Вольт-амперная характеристика солнечного модуля при значении температуры окружающей среды $t=15\text{ C}^0$

Вольт-ваттная характеристика солнечного модуля при значении температуры окружающей среды $t=15\text{ C}^0$ представлена на Рисунке 2.21

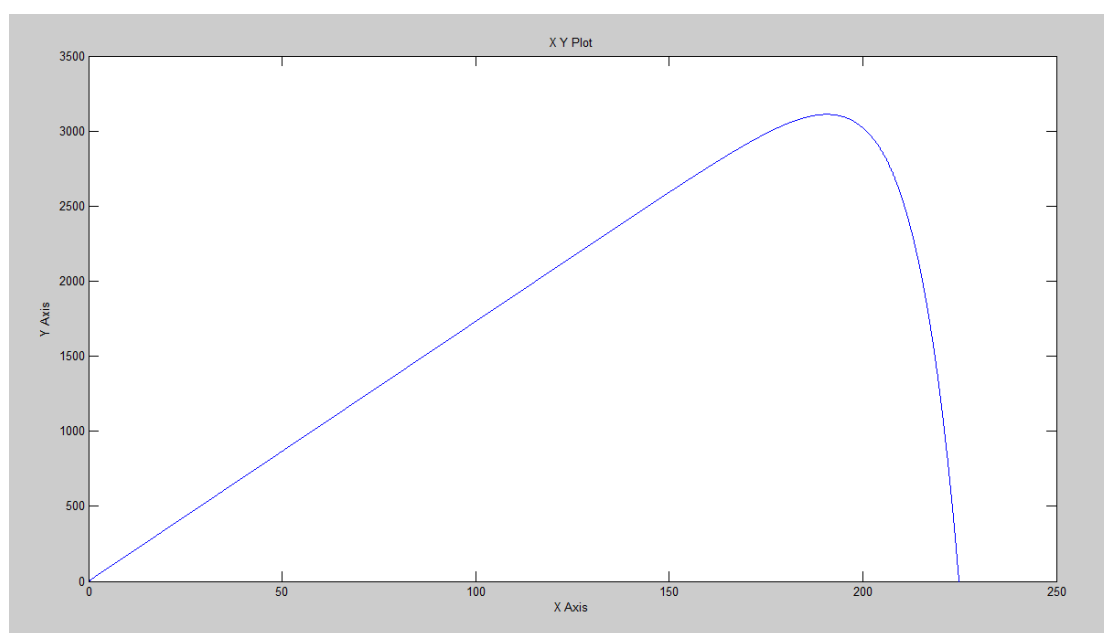


Рисунок 2.21- Вольт-ваттная характеристика солнечного модуля при значении температуры окружающей среды $t=15\text{ C}^0$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

130402.2019.572.11.00 ПЗ

Лист

47

Вольт-амперная характеристика солнечного модуля при значении температуры окружающей среды $t=10\text{ C}^0$ представлена на Рисунке 2.22

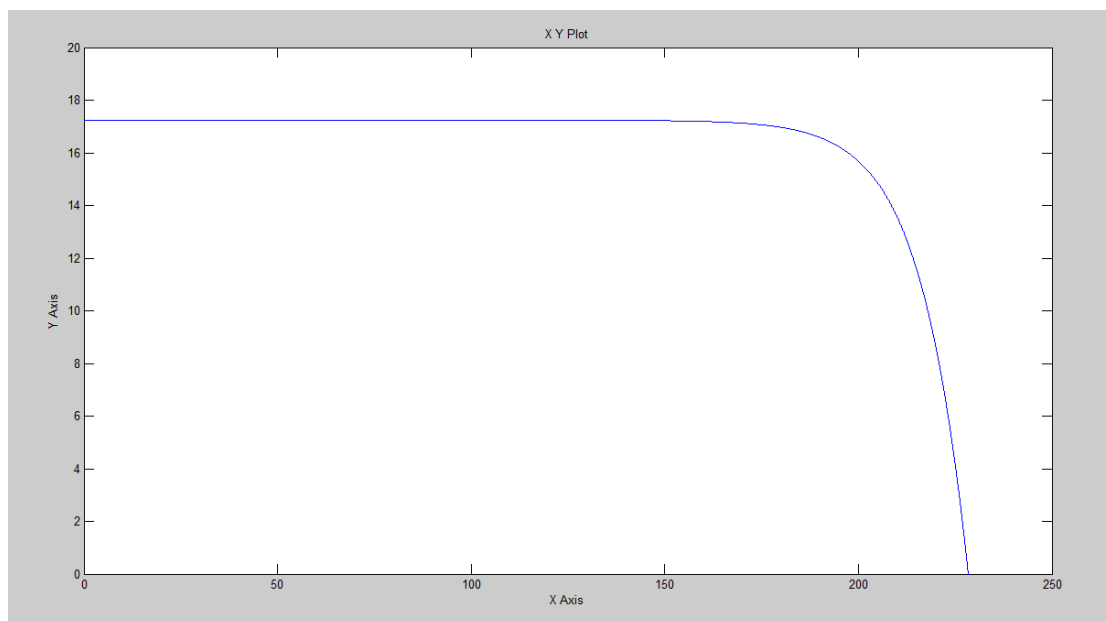


Рисунок 2.22-Вольт-амперная характеристика солнечного модуля при значении температуры окружающей среды $t=10\text{ C}^0$

Вольт-ваттная характеристика солнечного модуля при значении температуры окружающей среды $t=10\text{ C}^0$ представлена на Рисунке 2.23

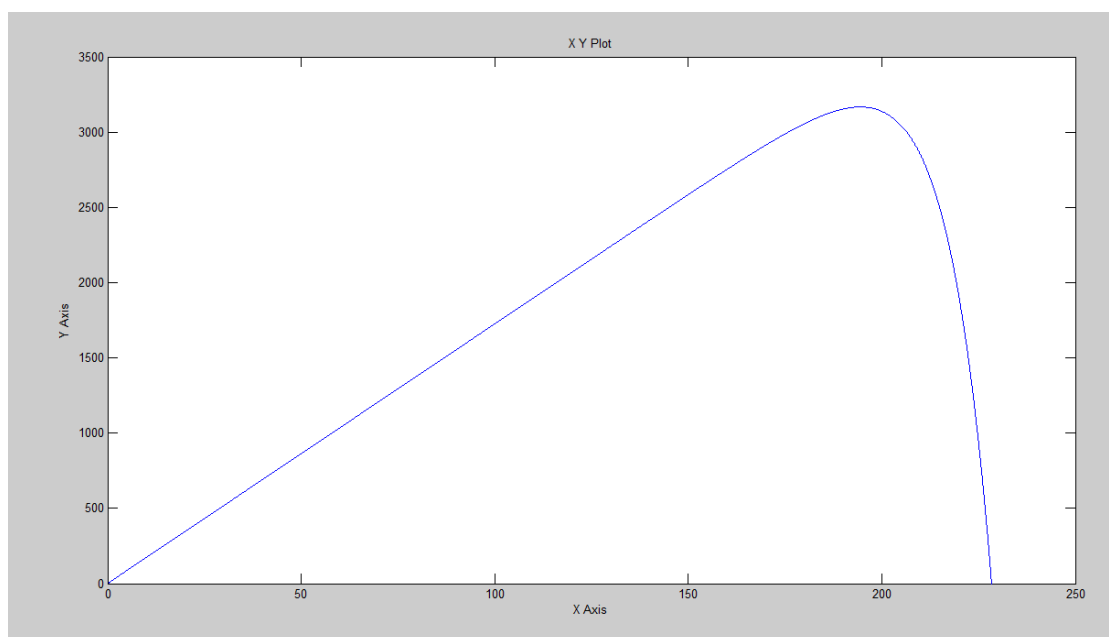


Рисунок 2.23 - Вольт-ваттная характеристика солнечного модуля при значении температуры окружающей среды $t=10\text{ C}^0$

Из рисунков 2.12-2.17 видно, что при различном значении солнечного излучения G значительно меняется ток солнечного элемента (при уменьшении излучения G падает ток солнечного элемента) и практически не меняется его напряжение.

Из рисунков 2.18-2.23 видно, что ток короткого замыкания незначительно меняется при различных значениях температуры окружающей среды, а напряжение холостого хода заметно меняется при изменении температуры.

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

2.3 Выбор типа генератора для ветро-энергетической установки

Для преобразования механической энергии вращения вала ветроколеса двигателя в электрическую в ветроэнергетических установках используются электрические генераторы [14]

Условия эксплуатации генератора ветроколеса накладывают определенные требования к его типу и конструкции.

Основные типы генераторов, применяемые в ВЭУ представлены на Рисунке 2.24

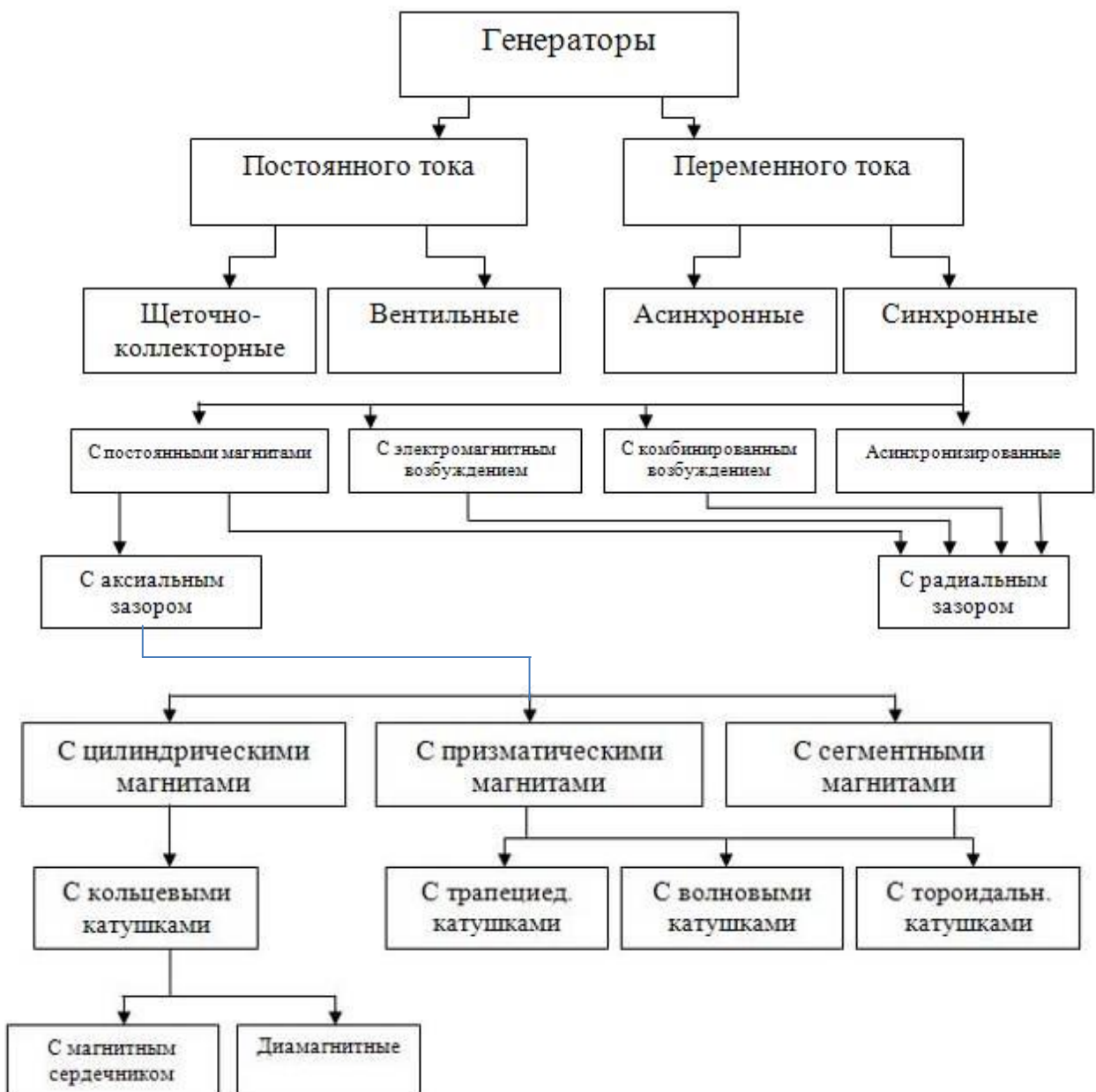


Рисунок 2.24 - типы генераторов используемые в ВЭУ

Каждый тип генератора для ВЭУ имеет свои преимущества и недостатки. Применение синхронного генератора с электромагнитным возбуждением (СГЭВ) позволяет регулировать вырабатываемое генератором напряжение (за счет изменения тока в обмотке возбуждения), что является несомненным достоинством т.к. в условиях изменяющейся скорости ветра и переменной нагрузке возникает потребность в стабилизации напряжения на выходе генератора.

К недостаткам данного типа генератора относятся: увеличение массы и габаритных размеров, потери вырабатываемой электроэнергии на обмотку возбуждения, применение токоснимающих щеток, подверженных разрушению при длительной работе.

Синхронный генератор с постоянными магнитами (СГПМ) лишен данных недостатков: возбуждение происходит с помощью постоянных магнитов, имеет высокий КПД, отсутствуют электрические потери на возбуждение.

К недостатком данного типа генератора относятся: постоянство магнитного потока т.е. невозможность регулирования напряжения на выходе генератора за счет изменения тока в обмотке возбуждения, большая цена на постоянные магниты.

Для ВЭУ очень малой, малой и средней мощности наиболее целесообразно применять синхронный генератор на постоянных магнитах с аксиальным зазором, при этом возможны конструкции без использования магнитомягких материалов в сердечнике якоря, что позволяет еще больше снизить потери. Дополнительным преимуществом является снижение реактивного момента генератора, что является важным при применении в таких электрических машин в ветро-энергетических установках, т.к. пульсации реактивного момента обычно приводят к нежелательной вибрации конструкции ВЭУ и возникновению шума

С точки зрения результирующего КПД для средних и больших ВЭУ следует рекомендовать асинхронные генераторы и асинхронизированные синхронные генераторы с созданием соответствующей электронной системы управления. [17].

Работа СГПМ описывается следующей системой уравнений в осях q и d, связанных с ротором

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q, \\ \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q}, \\ T_e = 1,5 p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \\ \frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m), \\ \frac{d}{dt} \theta = \omega_r \end{cases}$$

где L_q, L_d - индуктивности статора по осям q и d ;

R – сопротивление обмотки статора;

i_q, i_d , - проекции тока статора q и d ;

U_q, U_d - проекции напряжения статора на оси q и d ;

ω_r - угловая частота вращения ротора;

λ - магнитный поток постоянных магнитов, сцепленный с обмоткой статора;

p - число пар полюсов;

T_e - электромагнитный момент;

J - суммарный момент инерции ротора и нагрузки;

F – коэффициент трения;

θ - угол положения ротора;

T_m - момент сопротивления;

2.4 Выбор типа регулятора мощности

Регулятор мощности ветро-солнечной установки - устройство, предназначенное для выполнения следующих функций:

1. Управление мощностью ветро-солнечной установки
2. Контроль заряда / разряда батареи
3. Стабилизация напряжения, подаваемого в нагрузку
4. Защита электроустановки в рабочем и аварийном режиме

Функциональная схема регулятора мощности представлена на Рисунке 25



Рисунок 2.25 - Функциональная схема регулятора мощности

Трехфазное переменное напряжение, вырабатываемое ветрогенератором, преобразуется в постоянное напряжение с помощью трехфазного мостового выпрямителя (схема Ларионова) и подается на электронный преобразователь.

Электронный преобразователь является основой регулятора мощности. С помощью него стабилизируется выходное напряжение, регулируется мощность ветро-солнечной установки.

Регулирующим элементом электронного преобразователя является электронный ключ – полевой или биполярный транзистор.

Регулятор мощности управляется контроллером на основе микропроцессорной техники.

Так как в установке используется электроэнергия, вырабатываемая ветрогенератором и солнечной панелью, то применяются два электронных преобразователя.

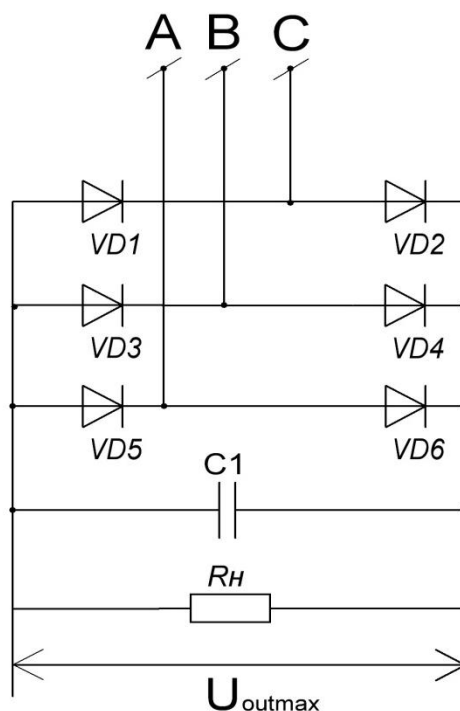


Рисунок 2.26 – Трехфазный мостовой выпрямитель

На электронный преобразователь солнечной установки поступает постоянное напряжение сразу с солнечной панели.

Регулятор мощности может быть спроектирован по двум схемам:

- 1) Схема линейного стабилизатора мощности
- 2) Схема импульсного стабилизатора мощности

Схема линейного стабилизатора мощности состоит из операционного усилителя (ОУ) в неинвертирующем включении с отрицательной обратной связью по напряжению, источника опорного напряжения U_{ref} и регулирующего транзистора $VT1$, включенного последовательно с нагрузкой. Выходное напряжение контролируется с помощью цепи обратной связи, выполненной на резистивном делителе $R1/R2$.

Операционный усилитель играет роль усилителя ошибки, в качестве которой здесь выступает разность между опорным напряжением, U_{ref} задаваемым источником опорного напряжения и выходным напряжением делителя напряжения $R1/R2$:

$$\Delta V = V_{ref} - \frac{V_{out} \times R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.29)$$

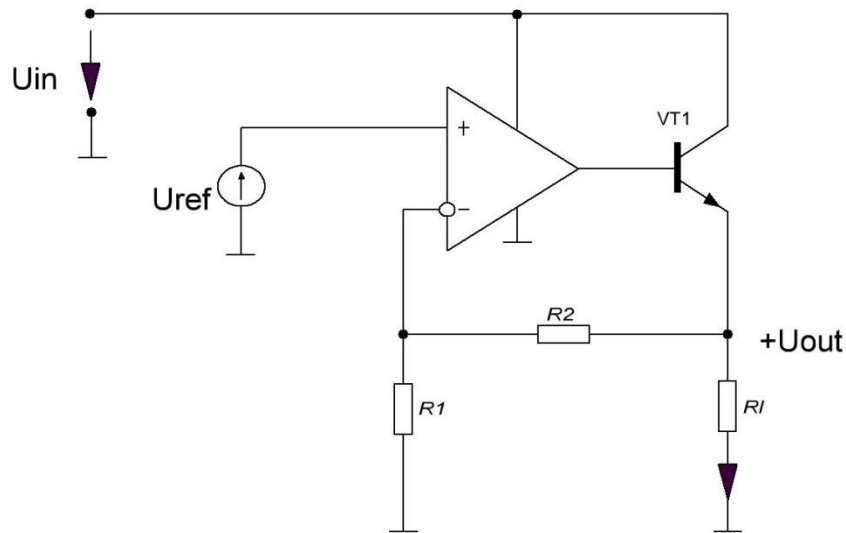


Рисунок 2.27 – базовая схема линейного стабилизатора мощности

При уменьшении выходного напряжения стабилизатора V_{out} на входе ОУ появляется сигнал ошибки $\Delta V > 0$, возрастает выходное напряжение усилителя, увеличивается ток и ток эмиттера регулирующего транзистора до значения, при котором выходное напряжение возрастет практически до первоначального значения.

К недостаткам схемы линейного стабилизатора напряжения можно отнести:

- невысокий коэффициент полезного действия (КПД), при низких напряжениях стабилизатора может падать ниже 50%
- невозможность выводить ветроустановку на оптимальную быстроходность Z и тем самым получать максимальный коэффициент использования энергии ветра C_p

В основе работы импульсных преобразователей служит процесс передачи энергии со входа на выход с использованием перекоммутации реактивного элемента на определенной частоте. В связи с этим преобразователи делятся на две группы – конденсаторные и индуктивные.

Поскольку в данной работе рассматривается схема индуктивного DC/DC-конвертора, то остановимся на изучении группы индуктивных преобразователей.

Основные виды импульсных преобразователей, которые относятся к индуктивным:

- 1) Повышающие (Step-Up);
- 2) Понижающие (Step-Down);
- 3) Повышающие/понижающие (Step-Up/Step-Down);
- 4) Инвертирующие (Inverter).

Независимо от того, какой тип преобразователя используется, для всех существует общий перечень элементов, а именно:

- 1) источник питания
- 2) коммутирующий элемент (в данной работе полевой транзистор)
- 3) накопитель энергии в виде катушки индуктивности или дросселя,
- 4) блокировочный диод и конденсатор для получения LC-фильтра на выходе, подключаемый параллельно нагрузке.

Соответственно, создавая определенную комбинацию из этого перечня элементов, можно реализовать любой из вышеперечисленных типов преобразователей.

Регулировка напряжения на выходе осуществляется посредством изменения ширины импульсов, которые управляют работой коммутационного устройства и, как следствие, объемом запасенной энергии в индуктивном элементе.

Устройство понижающего DC/DC-преобразователя:

Основным назначением данного вида преобразователя является уменьшение уровня выходного напряжения по отношению к входному. В различных источниках понижающие DC/DC-преобразователи имеют разное название: «Чопперы», «Buck-конверторы» или «Step-Down-конверторы».

Схема понижающего импульсного преобразователя изображена на Рисунке. На входе схемы установлен конденсатор C_{in} , который выполняет роль фильтра. На него подается напряжение U_{in} , которое необходимо преобразовать. В качестве ключевого элемента (VT) в схеме можно использовать любой транзистор (будь то биполярный транзистор или Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor), который будет выполнять коммутацию тока с большой частотой.

Также на схеме должны присутствовать разрядный диод (VD), дроссель (L) и конденсатор C_{out} . Последние два элемента образуют на выходе схемы LC-фильтр.

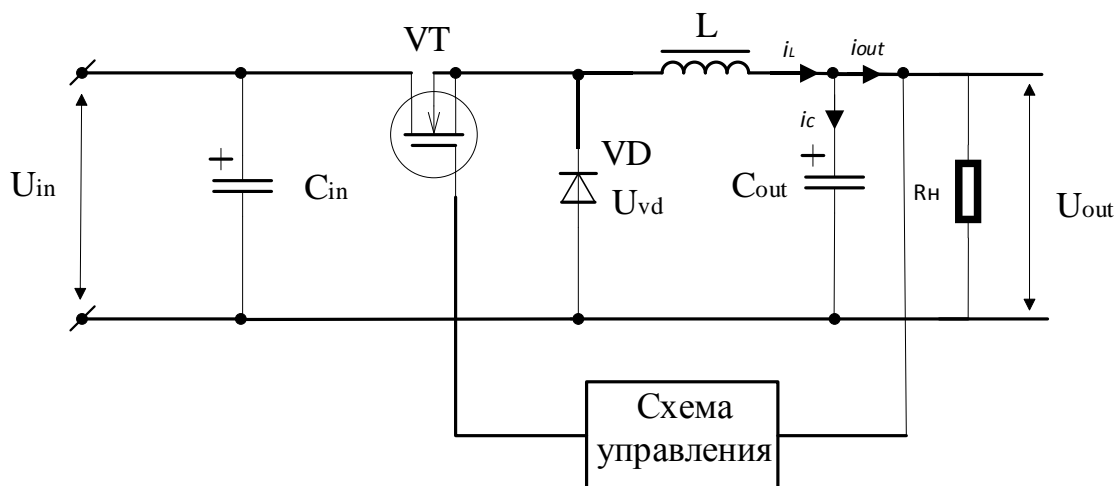


Рисунок 2.28 – схема понижающего импульсного преобразователя.

Схема управления, представленная на рисунке, выполняет роль по стабилизации напряжения или тока нагрузки R_n . Поскольку в данной схеме VT, L и R_n включены последовательно, то данный конвертер можно считать последовательной схемой.

Принцип работы понижающего DC/DC-преобразователя :

Транзистор VT может принимать только два состояния в процессе работы – это состояния отсечки и полной проводимости. Если данные состояния будут сменяться один за другим с периодом T, то приняв время, при котором ключ находится в проводящем состоянии за t_u , а время, при котором ключ разомкнут (находится в состоянии отсечки) за t_n , можно выразить коэффициент заполнения D:

$$D = \frac{t_u}{t_u + t_n} = \frac{t_u}{T} = t_u \times f \quad (2.30)$$

где f – частота коммутации.

Графическая иллюстрация коэффициента заполнения представлена на Рисунке 2.29

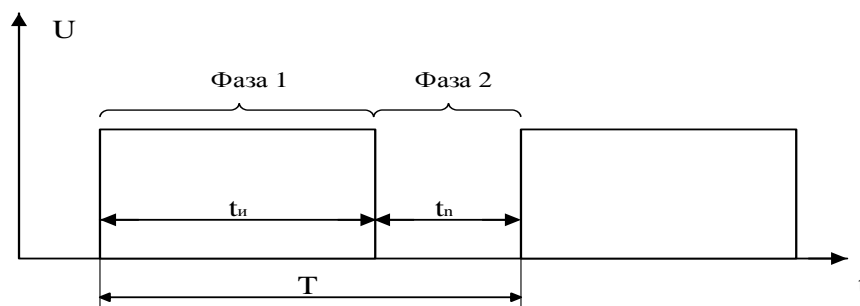


Рисунок 2.29 – Временная диаграмма для напряжения, при различных состояниях транзистора VT

На рисунке представлена временная диаграмма для напряжения при различных состояниях транзистора VT. Фаза 1 соответствует открытому состоянию ($D=1$) – происходит накопление энергии, фаза 2 – состоянию отсечки ($D=0$) – фаза разряда. Когда транзистор VT закрыт, напряжение, падающее на нагрузке, отсутствует. В состоянии полной проводимости входное напряжение равно выходному. Рассмотрим каждую фазу более подробно.

Фаза 1 или, так называемая, фаза накопления имеет место при t_{on} , то есть когда ключ VT находится в состоянии полной проводимости. В этом случае ток, протекает в цепи через дроссель L к нагрузке, которая в свою очередь шунтирована конденсатором C_{out} .

Открытое состояние транзистора представлено на Рисунке 30

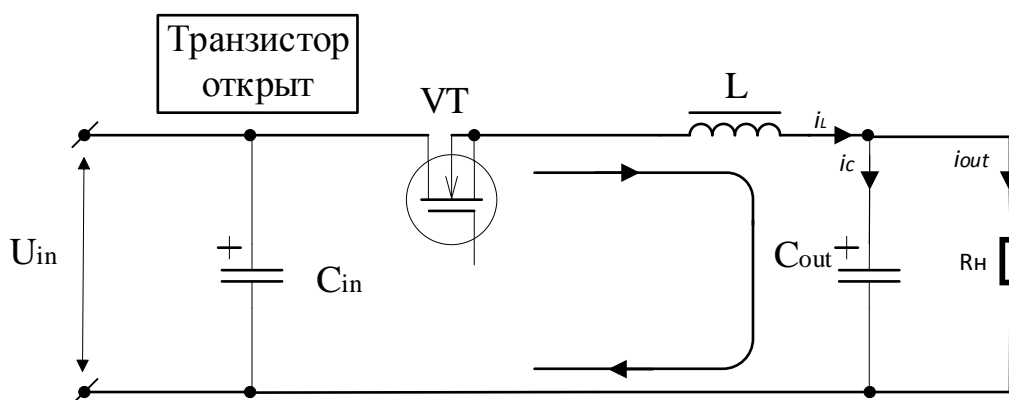


Рисунок 2.30 – Фаза накопления энергии.

Состояние понижающего преобразователя, находящегося в процессе закачки энергии (фаза 1), описывается дифференциальными уравнениями в форме Коши по первому и второму закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = U_{in} - U_{out} \\ C_{out} \frac{du}{dt} = i_L - \frac{U_{out}}{R_n} \end{cases} \quad (2.31)$$

где U_{in} – напряжение на входе преобразователя, В;

U_{out} – напряжение на выходе преобразователя, В;

C_{out} – емкость выходного конденсатора, мкФ;

i_L – ток в дросселе, А;

R_n – сопротивление нагрузки.

Фаза 2 – фаза разряда происходит после перехода ключа VT в режим отсечки и соответствует времени t_n на временной диаграмме. Фаза разряда представлена на Рисунке 31

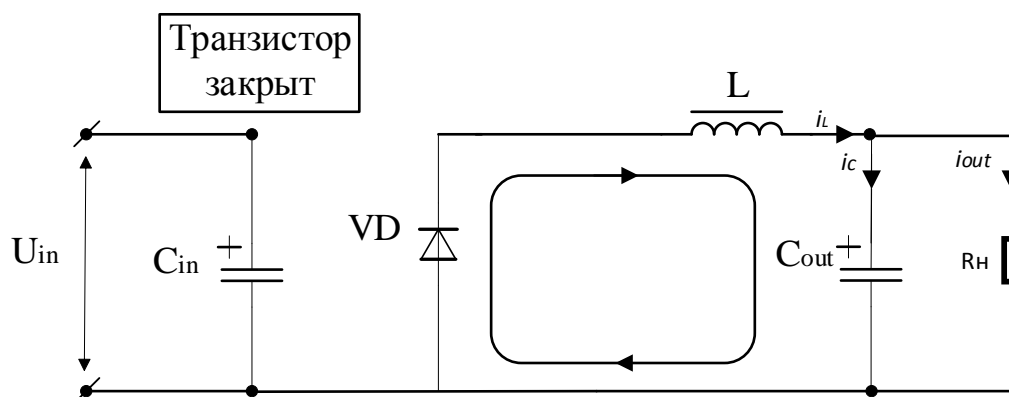


Рисунок 2.31 – Фаза разряда.

Ток на индуктивности не может измениться скачком и поменять своего направления, ток дросселя i_L мгновенно уменьшиться до нуля не может, поэтому он замыкается с помощью разрядного диода VD. Находясь в фазе разряда, получается, что источник питания отключен, и у дросселя L нет возможности пополнять убывающую энергию. Разрядка происходит в цепи «диод-нагрузка»

Состояние понижающего преобразователя после размыкания силового ключа описывается дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -U_{out} \\ C_{out} \frac{du}{dt} = i_L - \frac{U_{out}}{R_n} \end{cases} \quad (2.32)$$

2.5 Расчет понижающего импульсного преобразователя для ВЭУ

Данные для расчета представлены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – параметры регулятора мощности ВЭУ

Параметр	Значение
Мощность РМ ВЭУ номинальная P_{vnom} , Вт	3000
Напряжение на входе РМ ВЭУ линейное (не более), U_{vinmax} , В Трехфазного переменного тока	300
Частота коммутации электронного ключа f_{vsw} , кГц	100
Ток на выходе РМ ВЭУ (не более) $I_{voutmax}$, А	60
Напряжение на выходе РМ ВЭУ номинальное, постоянного тока, U_{vout} , В	48

Напряжение подаваемое на понижающий импульсный преобразователь определяется по формуле:

$$U_{pvinmax} = 2,34 \times \sqrt{2} \times \frac{U_{pinmax}}{\sqrt{3}} \quad (2.33)$$

$$U_{pvinmax} = 2,34 \times \sqrt{2} \times \frac{260}{\sqrt{3}} = 496, \text{ В}$$

2.5.1 Расчет индуктивности

Индуктивность катушки L находится из следующего выражения:

$$L = (U_{pvinmax} - U_{out}) \times \frac{U_{out}}{U_{pvinmax}} \times \frac{1}{f_{sw}} \times \frac{1}{LIR \times I_{outmax}}, \text{ Гн} \quad (2.34)$$

где $U_{pvinmax}$ - максимальное входное напряжение, подаваемое на преобразователь, В;

U_{out} - стабилизированное выходное напряжение, В;

f_{sw} - частота переключения понижающего преобразователя, Гц;

LIR - коэффициент пульсации тока индуктивности;

$I_{out\max}$ - максимальное значение выходного тока, А.

Чем больше индуктивность дросселя, тем больше его габариты, резистивное сопротивление, меньше обратный ток насыщения.

Поэтому амплитудный ток пульсаций в дросселе выбирают 30% от максимального допустимого тока преобразователя.

$$LIR = 0,3$$

Подставив значения в формулу, получим:

$$L = (496 - 48) \times \frac{48}{496} \times \frac{1}{100000} \times \frac{1}{0,3 \times 60} = 7,96 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$$

При выборе катушки индуктивности основным параметром, от которого зависят ее габариты, является максимально допустимый ток, при котором еще не наступает насыщение сердечника. Этот ток должен превышать пиковый ток через катушку при максимальной нагрузке преобразователя. Насыщение сердечника катушки уменьшает КПД преобразователя из-за увеличения потерь в ней, что приводит к повышению ее температуры. Пиковый ток катушки индуктивности I_{PEAK} можно вычислить следующим образом:

$$I_{PEAK} = I_{out\max} + \frac{\Delta I_{inductor}}{2} \quad (2.35)$$

$$\Delta I_{inductor} = LIR \times I_{out\max}, \quad (2.36)$$

$$\Delta I_{inductor} = 0,3 \times 60 = 18 \text{ А}$$

$$I_{PEAK} = 60 + \frac{18}{2} = 69 \text{ А}$$

При необходимости ограничить размеры катушки ток насыщения можно выбирать примерно на 20% больше пикового тока.

2. 5.2 Расчет выходного конденсатора

Ёмкость выходного конденсатора C_0 определяется по формуле:

$$C_0 = \frac{L \times \left(I_{out\max} + \frac{\Delta I_{inductor}}{2} \right)^2}{(\Delta U + U_{out})^2 - U_{out}^2} \quad (2.37)$$

где ΔU - максимальный выброс напряжения на выходе, В.

Максимальный выброс напряжения на выходе примем равным 100 мВ

$$C_0 = \frac{7,96 \times 10^{-5} \times \left(60 + \frac{18}{2} \right)^2}{(0,1 + 48)^2 - 48^2} = 39435 \quad \text{мкФ}$$

Если к этому добавить типичный разброс ёмкости конденсаторов 20%, то получим практическую ёмкость выходного конденсатора 47322 мкФ

Выходные пульсации на этом конденсаторе можно рассчитать по формуле:

$$U_{out\text{ripple}} = \frac{1}{2 \cdot C_0} \times \frac{U_{vin\max} - U_{out}}{L} \times \left(\frac{U_{out}}{U_{vin\max}} \times \frac{1}{f_{sw}} \right)^2 + \Delta I_{inductor} \times ESR_{C_0} \quad (2.38)$$

где ESR_{C_0} - эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора

ESR_{C_0} можно найти по формуле:

$$ESR_{C_0} = \frac{1}{\Delta I_{inductor}} \times \left(U_{out\text{ripple}} - \frac{1}{2 \cdot C_0} \times \frac{U_{vin\max} - U_{out}}{L} \cdot \left(\frac{U_{out}}{U_{vin\max}} \times \frac{1}{f_{sw}} \right)^2 \right) \quad (2.39)$$

В хорошо спроектированном понижающем преобразователе размах пульсаций выходного напряжения обычно не превышает 2%, поэтому

$$U_{out\text{ripple}} = 0,90 \text{ В}$$

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

$$ESR_{C_0} = \frac{1}{18} \times \left(0,90 - \frac{1}{2 \cdot 47322 \times 10^{-6}} \times \frac{496 - 48}{7,96 \times 10^{-5}} \times \left(\frac{48}{496} \times \frac{1}{100000} \right)^2 \right) = 0,0532$$

2.5.3 Расчет диода

Ограничивающим фактором при выборе диода является рассеиваемая мощность. Средняя мощность для наихудшего случая может быть рассчитана по следующей формуле:

$$P_{diode} = \left(1 - \frac{U_{out}}{U_{vinmax}} \right) \times I_{outmax} \times U_D \quad (2.40)$$

где U_D падение напряжения на диоде при заданном выходном токе I_{outmax}

В данном расчете используем диод Шоттки, падение напряжения которого составляет 0,3 В.

$$P_{dode} = \left(1 - \frac{48}{496} \right) \times 60 \times 0,3 = 16,27 \text{ Вт}$$

Для обеспечения надёжной работы во всём диапазоне входных напряжений надо также быть уверенным, что повторяющееся максимальное обратное напряжение для этого диода больше, чем максимальное входное напряжение.

$$U_{rpm} \geq U_{vinmax} \quad (2.41)$$

Максимальный допустимый прямой ток диода должен быть больше или равен максимальному выходному току.

$$I_{dmax} \geq I_{outmax} \quad (2.42)$$

2.5.4 Расчет электронного силового ключа

Имеются микросхемы стабилизаторов со встроенным электронным силовым ключом, рассчитанные на максимальные токи в пределах от 3 до 6 А. Поскольку, в данном случае, максимальный выходной ток преобразователя равен 60 А, то необходимо использовать внешний электронный ключ.

За последнее десятилетие в качестве электронного ключа широко

используются MOSFET и IGBT транзисторы.

В данной работе в качестве электронного ключа используем MOSFET транзистор.

При выборе транзистора необходимо знать максимальные температуры p - n -перехода $T_{j\max}$ и окружающей среды $T_{a\max}$. Температура $T_{a\max}$ обычно принимается равной 60°C , при этом $T_{j\max}$ не должна превышать $115\text{-}120^\circ\text{C}$.

Для MOSFET-транзистора максимально допустимое превышение температуры можно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned} T_{j\text{Rise}} &= T_{j\max} - T_{a\max} \\ T_{j\text{Rise}} &= 55 \text{ C}^0 \end{aligned} \quad (2.43)$$

Максимальная мощность P_{DTOT} , рассеиваемая MOSFET-транзистором, может быть вычислена, исходя из допустимого для транзистора превышения температуры и теплового сопротивления " p - n -переход – окружающая среда"

$$P_{\text{dtot}} = \frac{T_{\text{JRISE}}}{\Theta_{jA}} \quad (2.44)$$

где Θ_{jA} тепловое сопротивление " p - n -переход – окружающая среда", равное $0,16^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

$$P_{\text{dtot}} = \frac{55}{0,16} = 343,75 \text{ Вт}$$

Рассеиваемая MOSFET-транзистором мощность определяется падением напряжения на его сопротивлении, а также потерями на переключение. Потери на сопротивлении транзистора могут быть вычислены как:

$$P_{\text{DS}} = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{inmin}}} \times I_{\text{outmax}}^2 \times R_{\text{DS(ON)HOT}} \quad (2.45)$$

где $R_{\text{DS(ON)HOT}}$ - сопротивление открытого транзистора при температуре T_{JHOT}
 U_{inmin} - минимальное напряжение, которое может быть подано на понижающий импульсный преобразователь.

Беря во внимание тот факт, что максимальное сопротивление открытого транзистора в справочных данных указано при температуре 25°C , необходимо рассчитать его для температуры T_{JHOT}

Для этого воспользуемся эмпирической зависимостью 0,5% на С. Таким образом, сопротивление открытого транзистора при температуре T_{JHOT} вычисляется как:

$$R_{DS(ON)HOT} = [1 + 0,005(T_{JHOT} - 25) \times R_{DS(ON)25^{\circ}C}] \quad (2.46)$$

Принимая во внимание то, что потери на сопротивлении транзистора составляют примерно 60% общих потерь в нем, определим из уравнения максимально допустимое значение этого сопротивления при температуре $25^{\circ}C$,

$$R_{DS(ON)25^{\circ}C} = \frac{U_{in\ min}}{U_{out}} \times \frac{0,6P_{dot}}{I_{out\ max}^2 \times [1 + 0,005(T_{JHOT} - 25)]} \quad (2.47)$$

потери на переключение составляют незначительную часть рассеиваемой транзистором мощности, их все же следует принимать в расчет. Для приближенной оценки величины этих потерь можно воспользоваться уравнением :

$$R_{DSW} = \frac{C_{RSS} \times U_{in\ max}^2 \times f_{sw} \times I_{out\ max}}{I_{GATE}} \quad (2.48)$$

где I_{GATE} – пиковый втекающий/вытекающий ток управления затвором, отдаваемый контроллером

C_{RSS} - емкость "сток-затвор" транзистора

2.5.5 Расчет входного конденсатора

Габариты и емкость входного конденсатора определяются величиной пульсаций тока через него, которую можно вычислить, используя следующее уравнение:

$$I_{CINRMS} = I_{out\ max} \times \frac{\sqrt{U_{out} \cdot (U_{in\ max} - U_{out})}}{U_{in\ max}} \quad (2.49)$$

$$I_{CINRMS} = 60 \times \frac{\sqrt{48 \cdot (496 - 48)}}{496} = 17,74 \text{ А}$$

Если преобразователь используется в обычном лабораторном блоке питания, достаточно установить входной конденсатор емкостью 10...22 мкФ в расчете на 1 А выходного тока

В нашем случае емкость входного конденсатора можно выбрать равной 400 мкФ, при необходимости скорректировав ее по результатам испытаний.

2.6 Расчет понижающего импульсного преобразователя для гелио-установки

Данные для расчета представлены в таблице 2.2

Таблица 2.2- параметры регулятора мощности солнечной батареи

Параметр	Значение
Мощность номинальная РМ СБ P_{spout} , Вт	3000
Напряжение на входе РМ СБ линейное (не более), $U_{vpinmax}$, В	400
Ток на выходе РМ СБ (не более) $I_{spoutmax}$, А	60
Напряжение на выходе РМ ВЭУ номинальное, постоянного тока, U_{spout} , В	48
Частота коммутации электронного ключа f_{vsw} , кГц	100

Чем больше индуктивность дросселя, тем больше его габариты, резистивное сопротивление, меньше обратный ток насыщения.

Поэтому амплитудный ток пульсаций в дросселе выбирают 30% от максимального допустимого тока преобразователя.

$$LIR = 0,3$$

2. 6.1 Расчет индуктивности

Индуктивность катушки L находится по формуле (2.34):

$$L = (400 - 48) \times \frac{48}{400} \times \frac{1}{100000} \times \frac{1}{0,3 \times 7,04} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}, \text{ Гн}$$

Пиковый ток катушки индуктивности I_{PEAK} вычисляется по формулам (2.35), (2.36):

$$\Delta I_{inductor} = 0,3 \times 7,04 = 2,112 \text{ А}$$

$$I_{PEAK} = 7,04 + \frac{2,112}{2} = 8,096 \text{ А}$$

2. 6.2 Расчет выходного конденсатора

Емкость выходного конденсатора C_0 определяется по формуле (2.37):

Максимальный выброс напряжения на выходе примем равным 100 мВ

$$C_0 = \frac{2 \times 10^{-4} \times \left(7,04 + \frac{2,112}{2}\right)^2}{(0,1 + 48)^2 - 48^2} = 1364,1 \text{ мкФ}$$

Если к этому добавить типичный разброс ёмкости конденсаторов 20%, то получим практическую ёмкость выходного конденсатора 1636,92 мкФ

Выходные пульсации на этом конденсаторе можно рассчитать по формуле (2.38), (2.39):

В хорошо спроектированном понижающем преобразователе размах пульсаций выходного напряжения обычно не превышает 2%, поэтому

$$U_{outripple} = 0,90 \text{ В}$$

$$ESR_{C_0} = \frac{1}{2,112} \times \left(0,90 - \frac{1}{2 \cdot 1636,92 \times 10^{-6}} \times \frac{400 - 48}{2 \times 10^{-4}} \times \left(\frac{48}{400} \times \frac{1}{100000} \right)^2 \right) = 0,1577$$

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

2.6.3 Расчет диода

Средняя мощность для наихудшего случая может быть рассчитана по следующей формуле (2.40):

В данном расчете используем диод Шоттки, падение напряжения которого составляет 0,3 В:

$$P_{diode} = \left(1 - \frac{48}{400}\right) \times 7,04 \times 0,3 = 1,858 \text{ Вт}$$

Для обеспечения надёжной работы во всём диапазоне входных напряжений надо также быть уверенным, что повторяющееся максимальное обратное напряжение для этого диода больше, чем максимальное входное напряжение.

$$U_{RRM} \geq U_{INMAX}$$

Максимальный допустимый прямой ток диода должен быть больше или равен максимальному выходному току.

$$I_{DMAX} \geq I_{outmax}$$

2.6.4 Расчет электронного силового ключа

При выборе транзистора необходимо знать максимальные температуры p - n -перехода T_{jmax} и окружающей среды T_{amax} . Температура T_{amax} обычно принимается равной 60 °С, при этом T_{jmax} не должна превышать 115-120 °С.

Для MOSFET-транзистора максимально допустимое превышение температуры можно вычислить по формуле (2.43):

$$T_{jRise} = 55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Максимальная мощность P_{DTOT} , рассеиваемая MOSFET-транзистором, может быть вычислена, исходя из допустимого для транзистора превышения температуры и теплового сопротивления " p - n -переход – окружающая среда" и вычисляется по формуле (2.44)

$$P_{DTOT} = \frac{55}{0,16} = 343,75 \text{ Вт}$$

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

Рассеиваемая MOSFET-транзистором мощность определяется падением напряжения на его сопротивлении, а также потерями на переключение. Потери на сопротивлении транзистора могут быть вычислены как:

$$P_{DS} = \frac{U_{out}}{U_{inmin}} \times I_{outmax}^2 \times R_{DS(ON)HOT}$$

где $R_{DS(ON)HOT}$ - сопротивление открытого транзистора при температуре T_{JHOT}

Беря во внимание тот факт, что максимальное сопротивление открытого транзистора в справочных данных указано при температуре $25^{\circ}C$, необходимо рассчитать его для температуры T_{JHOT}

Для этого воспользуемся эмпирической зависимостью 0,5% на C.

Таким образом, сопротивление открытого транзистора при температуре T_{JHOT} вычисляется как:

$$R_{DS(ON)HOT} = [1 + 0,005(T_{JHOT} - 25) \times R_{DS(ON)25^{\circ}C}]$$

Принимая во внимание то, что потери на сопротивлении транзистора составляют примерно 60% общих потерь в нем, определим из уравнения максимально допустимое значение этого сопротивления при температуре $25^{\circ}C$,

$$R_{DS(ON)25^{\circ}C} = \frac{U_{INMIN}}{U_{OUT}} \times \frac{0,6P_{DOT}}{I_{OUTMAX}^2 \times [1 + 0,005(T_{JHOT} - 25)]}$$

потери на переключение составляют незначительную часть рассеиваемой транзистором мощности, их все же следует принимать в расчет. Для приближенной оценки величины этих потерь можно воспользоваться уравнением :

$$R_{DSW} = \frac{C_{RSS} \times U_{inmax}^2 \times f_{sw} \times I_{outmax}}{I_{GATE}}$$

где I_{GATE} – пиковый втекающий/вытекающий ток управления затвором, отдаваемый контроллером

C_{RSS} - емкость "сток-затвор" транзистора

2.6.5 Расчет входного конденсатора

Габариты и емкость входного конденсатора определяются величиной пульсаций тока через него, которую можно вычислить по формуле (2.49)

$$I_{CINRMS} = 7,04 \times \frac{\sqrt{48 \cdot (400 - 48)}}{400} = 2,287 \text{ А}$$

Если преобразователь используется в обычном лабораторном блоке питания, достаточно установить входной конденсатор емкостью 10...22 мкФ в расчете на 1 А выходного тока

В нашем случае емкость входного конденсатора можно выбрать равной 45 мкФ, при необходимости скорректировав ее по результатам испытаний

2.7 Модель трехфазного мостового выпрямителя и понижающего импульсного преобразователя для ветро-энергетической установки в программе Matlab/Simulink

В программе Matlab/Simulink создается модель трехфазного мостового выпрямителя и понижающего импульсного преобразователя ветро-энергетической установки с помощью следующих блоков библиотеки Simscape:

- Universal Bridge
- Mosfet
- Diode
- Series RLC Branche
- Implement generic battery

С помощью элемента Universal Bridge моделируется 3-х фазный мостовой неуправляемый выпрямитель: в окне задания параметров выбирается значение количества плеч моста, тип полупроводникового прибора (в данном случае диод), вводятся значения сопротивления демпфирующей цепи, емкости демпфирующей цепи.

Окно задания параметров блока Universal Bridge показано на Рисунке 2.32

С помощью компонента Series RLC Branche моделируются индуктивность и конденсатор.

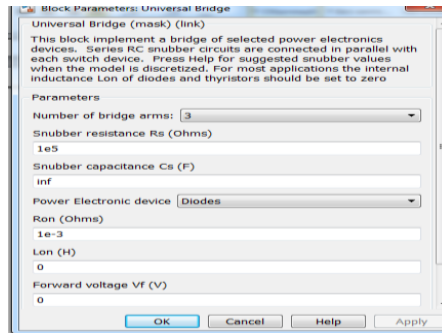


Рисунок 2.32 - окно задания параметров элемента Universal Bridge

В окне задания параметров выбирается необходимый элемент (конденсатор или индуктивность), вводится значение индуктивности или емкости, полученные из расчета.

Окно задания параметров элемента Series RLC Branche показано на Рисунке 2.33

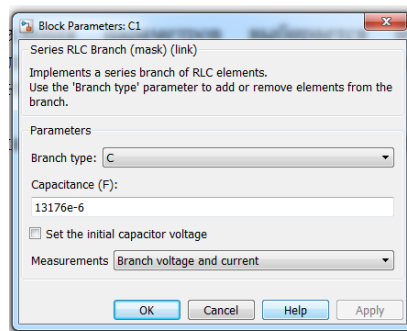


Рисунок 2.33 - окно задания параметров элемента Series RLC Branche

Для измерения значений тока и напряжения модели преобразователя, используются блоки Current Measurement и Voltage Measurement.

С помощью блока Mosfet моделируется полевой транзистор с изолированным затвором.

Составленная из выбранных блоков модель показана на Рисунке 2.34

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

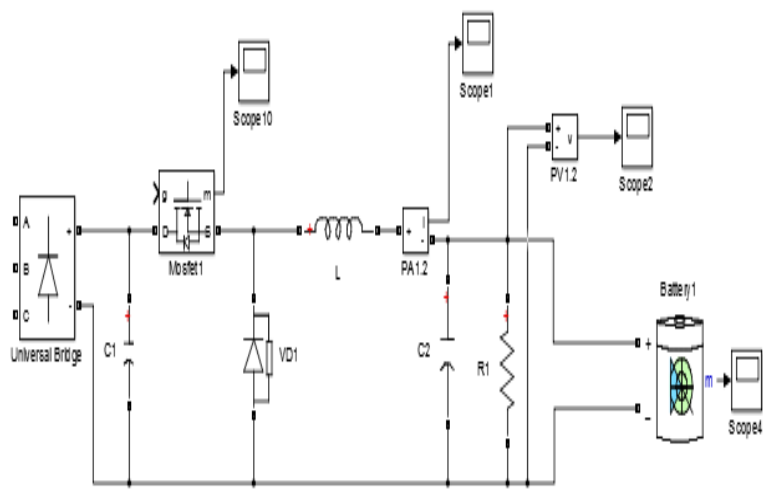


Рисунок 2.34 - модель трехфазного мостового выпрямителя и понижающего импульсного преобразователя для ветро-энергетической установки в программе Matlab/Simulink

2.8 Модель понижающего импульсного преобразователя для гелио-установки в программе Matlab/Simulink

Модель понижающего импульсного преобразователя для гелио-установки представлена на Рисунке 2.35

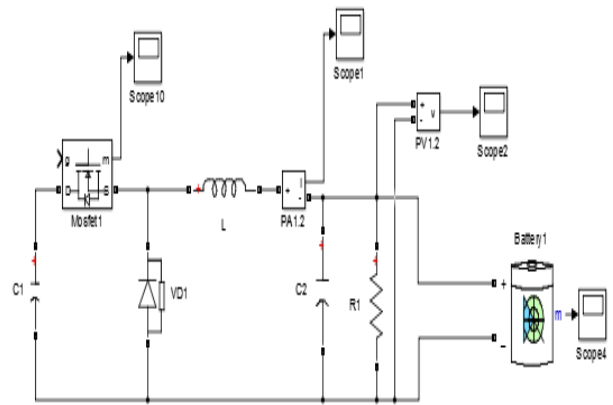


Рисунок 2.35 - модель понижающего импульсного преобразователя для гелио-установки в программе Matlab/Simulink

Эта модель преобразователя отличается от модели для ВЭУ только значениями параметров основных элементов.

2.9 Модель управляющего контроллера в программе Matlab/Simulink

Управляющий контроллер – часть регулятора мощности, электронное устройство, которое с помощью датчиков измеряет необходимые физические величины ветро-солнечной установки, обрабатывает их по заданному алгоритму и выдает управляющий сигнал на исполнительное устройство (в данном случае понижающий импульсный преобразователь)

Основные функции, накладываемые на контроллер:

- регулирование тока генератора в условиях постоянно изменяющейся скорости ветра для обеспечения необходимой частоты вращения;
- ограничение тока заряда аккумуляторной батареи;
- обеспечение условий безопасной работы оборудования ветро-энергетической установки в рабочих и аварийных режимах.

Simulink позволяет пользователю создавать собственные блоки и объединять их в библиотеки для дальнейшего использования. Для этого существуют два способа: графический и программный. Графический способ представляет собой создание модели из стандартных блоков Simulink для реализации функций системы управления. Этот способ не является универсальным в силу того, что для перенесения результатов разработки на целевую систему управления требуются трудоемкие операции по адаптации свойств разрабатываемого управляющего устройства к результатам полученной компьютерной модели.

При использовании программного способа создается компьютерная модель управляющего устройства, в основе которой лежат свойства и алгоритмы работы управляющего устройства. Работа управляющего устройства осуществляется с помощью программного обеспечения, написанного на языке высокого уровня, и пригодного для управления компьютерной моделью и целевым устройством.

При этом задача состоит в том, чтобы создать пользовательский блок, моделирующий работу управляющей системы в соответствии с заданным алгоритмом, который мог бы использовать программный код целевой системы с микропроцессорным управлением[13].

Для осуществления возможности разработки блоков пользователя с различными свойствами, задаваемыми с помощью программы, в Simulink существует блок S-Function. Это блок должен быть связан с программой, написанной на языке высокого уровня и описывающей работу этого блока. В этой программе обычно задаются такие параметры, как число входов и выходов этого устройства, параметры инициализации блока, а также взаимосвязь между входами и выходами. При этом описание работы этого

блока может быть выполнено на языке C, что позволяет потом с легкостью перенести эту программу на целевое устройство [11].

Для проверки работоспособности математической модели она была реализована с помощью блока S-Function в пакете для математических расчетов MATLAB/Simulink, общий вид модели представлен на рисунке

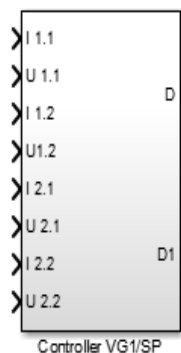


Рисунок 2.36 - модель управляющего контроллера в программе MATLAB/Simulink

```

Editor - D:\Projects\Matlab\controller\charge_controller.c*
EDITOR VIEW
charge_controller.c*
7  #define NINPUTS 9
8  #define NOOUTPUTS 4
9
10 /* Function: mdlInitializeSizes =====
11 static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
12 {
13     int_T i;
14
15     ssSetNumSFcnParams(S, 0);
16     if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
17         return; /* Parameter mismatch will be reported by Simu
18     }
19
20     if (!ssSetNumInputPorts(S, NINPUTS)) return;
21     for (i = 0; i < NINPUTS; i++) {
22         ssSetInputPortWidth(S, i, 1);
23         ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, i, 1);
24         ssSetInputPortOffsetTime(S, i, 0.0);
25         ssSetInputPortOverWritable(S, i, 0);
26     }

```

Рисунок 2.37 – программа управляющего контроллера в MATLAB/Simulink

2.10 Модель гибридного ветро-солнечного энергокомплекса в программе Matlab/Simulink

Из полученных в предыдущих разделах моделей составляем общую модель ветро-солнечного энергокомплекса.

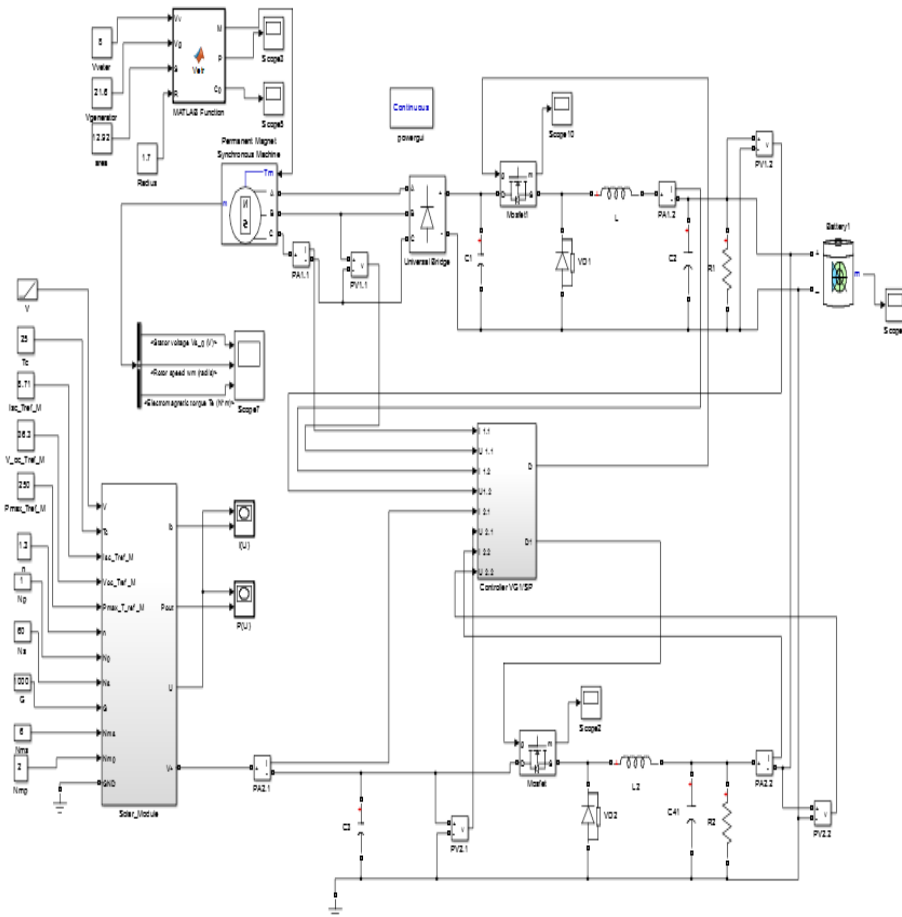


Рисунок 2.38 - Модель ветро-солнечного энергокомплекса в программе Matlab/Simulink

2.11 Выводы по главе

В данной главе дано математическое описание ветроколеса и солнечной панели. Были выбраны тип генератора и электронного преобразователя для ВЭУ. Был произведен расчет элементов электронного преобразователя (понижающего импульсного преобразователя) для ВЭУ и солнечной установки.

В программе Matlab/Simulink были получены:

- Модель ветроколеса
- Модель солнечной панели
- Модель понижающего импульсного преобразователя для ВЭУ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

- Модель понижающего импульсного преобразователя для солнечной установки
- Модель управляющего контроллера
- Общая модель ветро-солнечного энергокомплекса.

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

3 ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ВЕТРО-СОЛНЕЧНОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА

3.1 Исследование модели ветро-энергетической установки

Модель ветро-энергетической установки исследуется с помощью метода поиска экстремума. [10]

Метод поиска экстремума является одним из видов метода отслеживания точки максимальной мощности. [10]

Основой этого метода является постоянный поиск максимальной мощности ветро-установки.

Алгоритм этого метода представлен на Рисунке 3.1

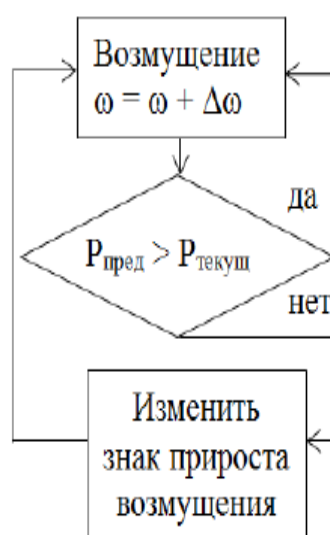


Рисунок 3.1 – алгоритм метода поиска экстремума

Измеренные данные синхронного генератора (ток, напряжение) поступают в регулятор мощности. Вычисляется мощность в данный момент времени.

Регулятор мощности изменяет частоту вращения ротора ветро-установки на некоторую величину $\Delta\omega$, далее вычисляется мощность при изменившейся частоте вращения. Сравниваются текущая мощность P_T и предыдущая P_{II} ,

Делается вывод об увеличении или уменьшении вырабатываемой мощности. Система управления постепенно выводит ветро-установку на максимальную вырабатываемую мощность в данных условия внешней среды.

Принцип работы метода поиска экстремума представлен на Рисунке 3.2

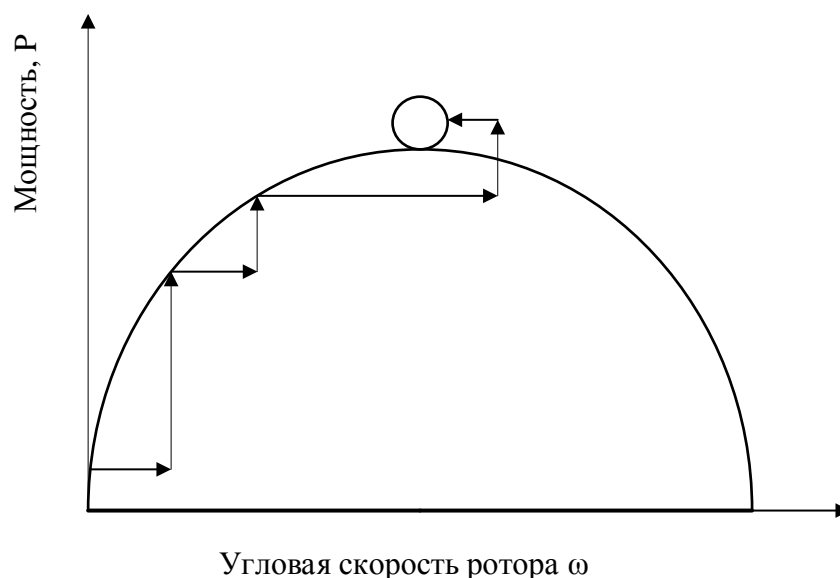


Рисунок 3.2 – принцип работы метода поиска экстремума

Частота вращения ветроколеса изменяется регулятором мощности с помощью понижающего импульсного преобразователя.

Из формулы (2.9) видно, что вращательное движение ветроколеса зависит от электромагнитного момента $M_{эм}$ синхронного генератора. Электромагнитный момент $M_{эм}$ можно регулировать с помощью изменения тока в обмотке статора синхронного генератора. Ток в обмотке статора генератора регулируется с помощью коэффициент заполнения импульсов D понижающего импульсного преобразователя по формуле:

$$I_{вых} = I_{вх} \times D \quad (3.1)$$

где $I_{вх}$ - ток на входе понижающего импульсного преобразователя, А

$I_{вых}$ - ток на выходе понижающего импульсного преобразователя, А

Алгоритм метода поиска экстремума с помощью изменения коэффициента заполнения импульсов представлен на Рисунке 3.3

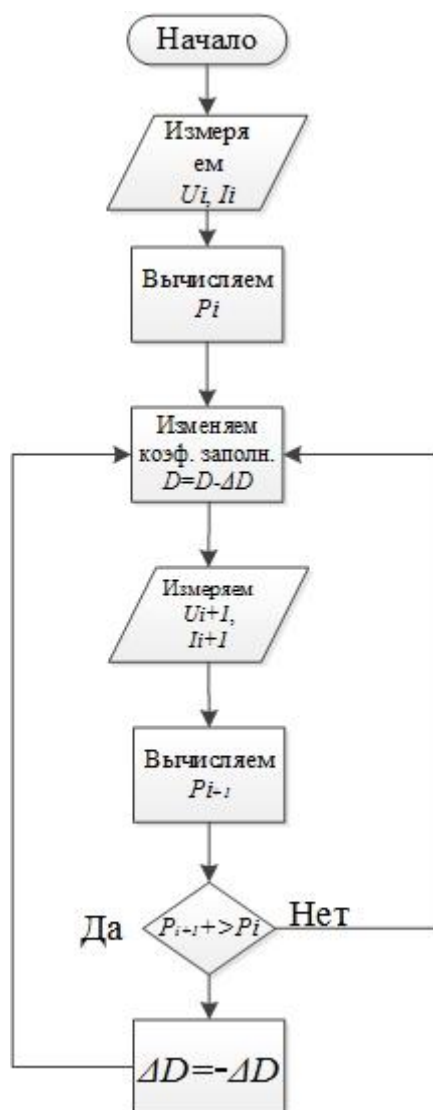


Рисунок 3.3 - Алгоритм метода поиска экстремума с помощью изменения коэффициента заполнения импульсов

Применим данный алгоритм в исследовании компьютерной модели ветроустановки.

Например: скорость ветра $V_v = 10$ м/с,

скорость генератора $V_g = 30$ м/с.

График регулирования мощности с помощью алгоритма поиска экстремума представлен на Рисунке 3.4. Вырабатываемая мощность ветроустановки постепенно достигает максимального значения при текущей постоянной скорости ветра.

Так же на Рисунке 3.4 изображены график мощности ветроустановки при той же скорости ветра без использования отбора мощности.

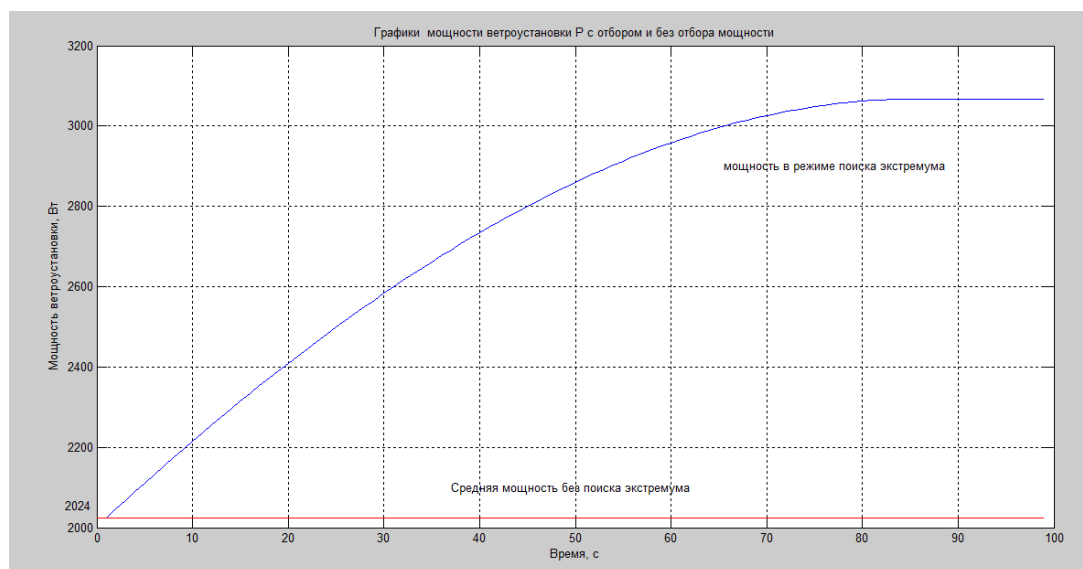


Рисунок 3.4 - график режима поиска экстремума ветро-установки

Из данного графика видна эффективность применения этого метода: в режиме поиска экстремума ветро-энергетическая установка вырабатывает мощность свыше 3000 Вт, без использования данного режима при постоянной скорости ветра V_v ветро-энергетическая установка вырабатывала мощность 2024 Вт.

3.2 Исследование модели гелио - установки

Регулятор мощности гелио-установки работает в двух режимах:

- 1) Режим заряда оптимальным током аккумуляторной батареи
- 2) Режим поиска экстремальной мощности

Так же как в регуляторе мощности ветро-энергетической установки, управление осуществляется за счет изменения коэффициента заполнения импульсов D понижающего импульсного преобразователя.

Алгоритм режима заряда оптимальным током работает следующим образом :

Регулятор мощности измеряет значения тока и напряжения аккумуляторной батареи. Когда значение тока заряда аккумуляторной батареи не выходит из определенного интервала, коэффициент заполнения D остается неизменным. Если ток заряда уменьшается, то коэффициент заполнения D увеличивается, если ток заряда увеличивается, то

коэффициент заполнения D , наоборот - уменьшается. При достижении аккумуляторной батареи максимального значения коэффициент заполнения импульсов уменьшается пропорционально дальнейшему увеличению напряжения.

Алгоритм заряда оптимальным током представлен на Рисунке 3.5

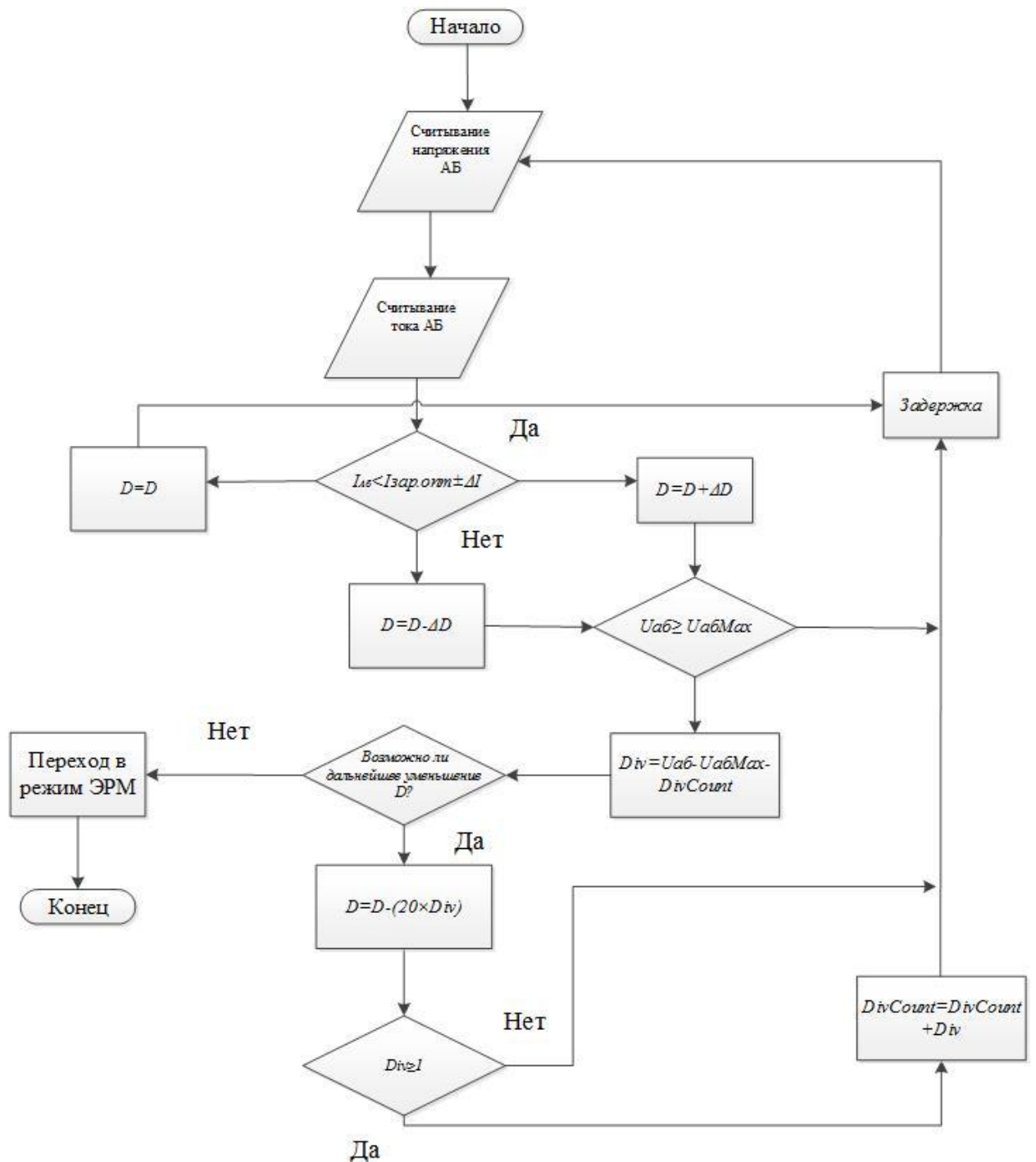


Рисунок 3.5 - алгоритм заряда оптимальным током

Алгоритм режима поиска экстремальной мощности (представлен на Рисунке) работает следующим образом:

Регулятор мощности измеряет значения тока и напряжения аккумуляторной батареи. Вычисляет значение текущей мощности. В первый

замер, текущая мощность запоминается как мощность, полученная на предыдущем шаге. После увеличивается коэффициент заполнения импульсов на определенное значение $D = D + \Delta$, вычисляется текущая мощность P_{i+1} ,

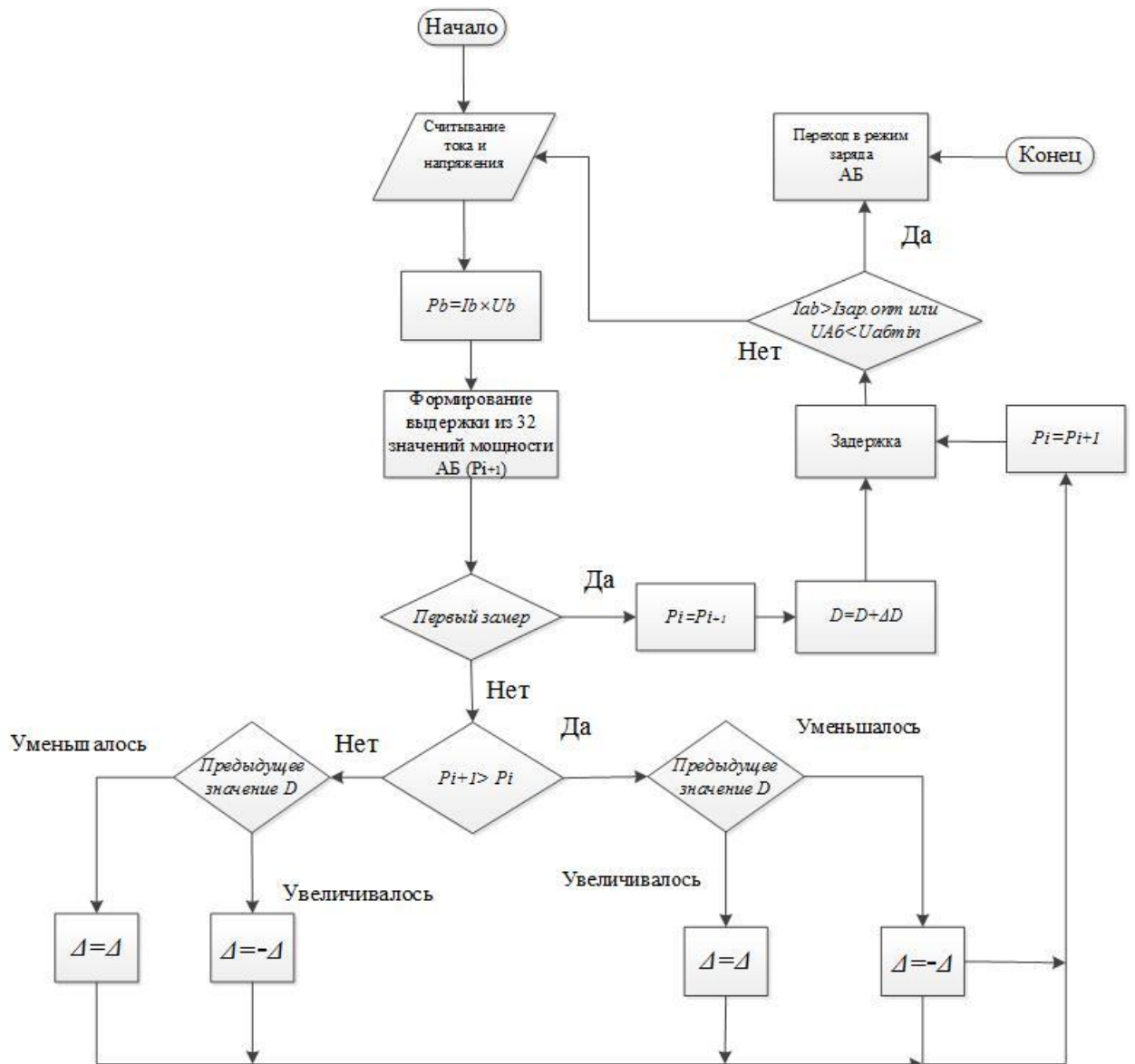


Рисунок 3.6 - режим поиска экстремальной мощности

Сравниваются текущая мощность P_{i+1} и предыдущая P_i . Если вырабатываемая солнечной батареей мощность увеличилась, то происходит дальнейшее увеличение коэффициента заполнения импульсов. В случае уменьшения вырабатываемой мощности, коэффициент заполнения импульсов уменьшается.

3.3 Выводы по главе

В данной главе были исследованы:

- модель ветро-энергетической установки
- модель гелио - установки

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		83

4 РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ

Упрощенная принципиальная схема регулятора мощности изображена на Рисунке 4.1 в виде блока генератора и блока управления с датчиками тока I. В основе управления лежит схема с портом программирования RS-232.

Регулятор мощности спроектирован по схеме понижающего импульсного преобразователя, с несколькими контурами обратной связи (Рисунок 4.1).

Измеряемые параметры для обеспечения оптимального алгоритма регулирования:

- напряжение и ток на аккумуляторной батарее;
- напряжение и ток действующей нагрузки;
- частота тока и напряжение в фазе генератора;

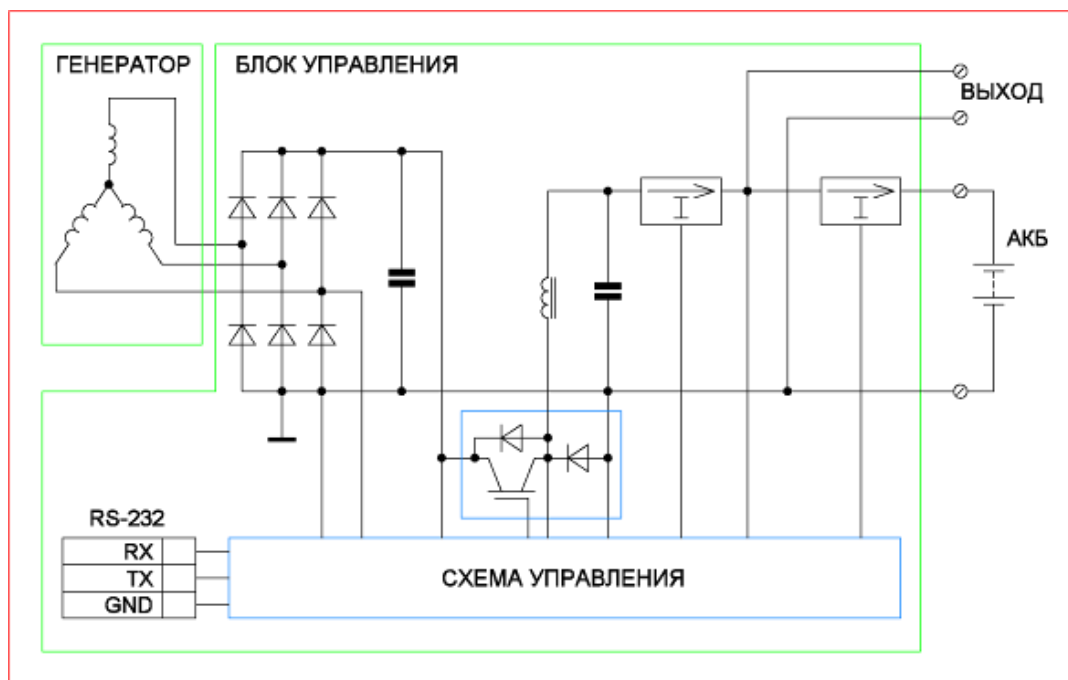


Рисунок 4.1 – Упрощенная принципиальная схема регулятора мощности ВЭУ-3

Алгоритм работы ВЭУ

1. Измерение напряжения и тока в цепи нагрузки, расчет мгновенной потребляемой мощности.
2. Измерение частоты тока в фазе генератора и расчет частоты вращения ротора ветроколеса.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

3. Определение располагаемой мощности, используя частоту вращения ротора и таблицу мощностей ротора.

4. Определение максимально допустимой мощности зарядки аккумуляторной батареи, используя максимально допустимый ток зарядки батареи и напряжение на ней.

5. Расчет суммарной требуемой мощности для данного момента времени.

6. Сравнение допустимой и требуемой мощностей и определение минимальной из них.

7. С помощью цифровых потенциометров в цепях обратных связей регулятора задание действующей отбираемой мощности, основываясь на предыдущих расчетах.

Таким образом, с помощью управляющего контроллера, встроенного в регулятор мощности ветроэнергетической установки удастся существенно уменьшить потери при преобразовании и максимально полно использовать энергию ветра.

Принципиальная схема регулятора мощности показана на Рисунке 4.2

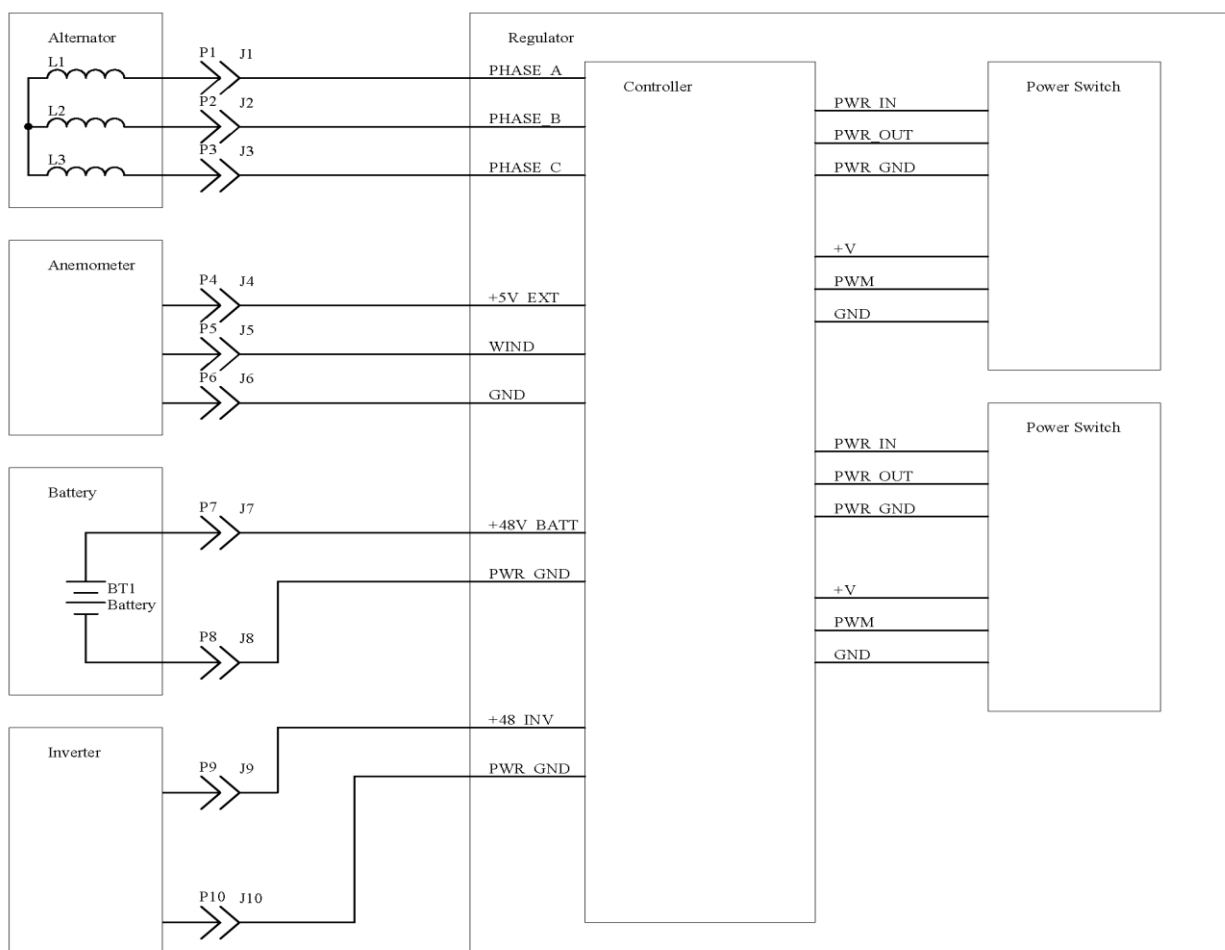


Рисунок 4.2 – Принципиальная схема регулятора мощности ВЭУ

На рисунке 4.3 изображена электрическая принципиальная схема трехфазного выпрямителя. Выпрямленное от ВЭУ напряжение подается на вход PWR_IN электронного силового ключа Power Switch, собранного по схеме понижающего импульсного преобразователя.

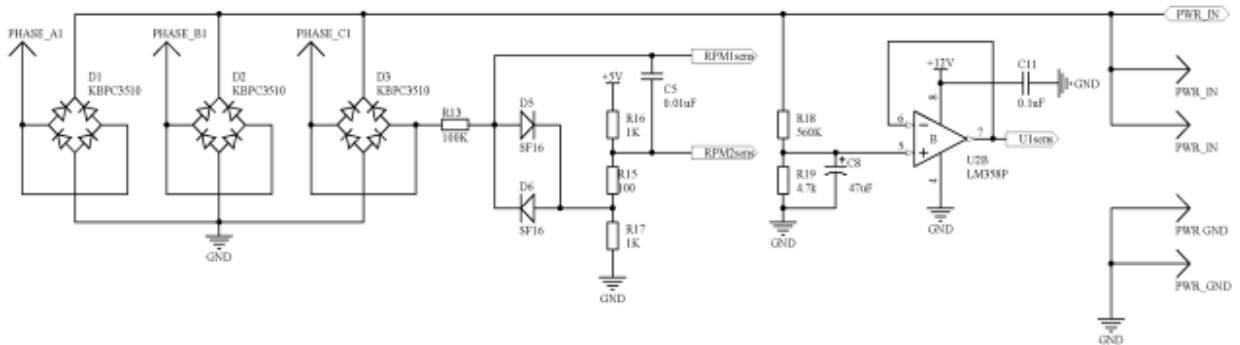


Рисунок 4.3- Электрическая принципиальная схема регулятора мощности ВЭУ, трехфазный выпрямитель

Электрическая принципиальная схема силового ключа (Power Switch) изображена на Рисунке 4.4

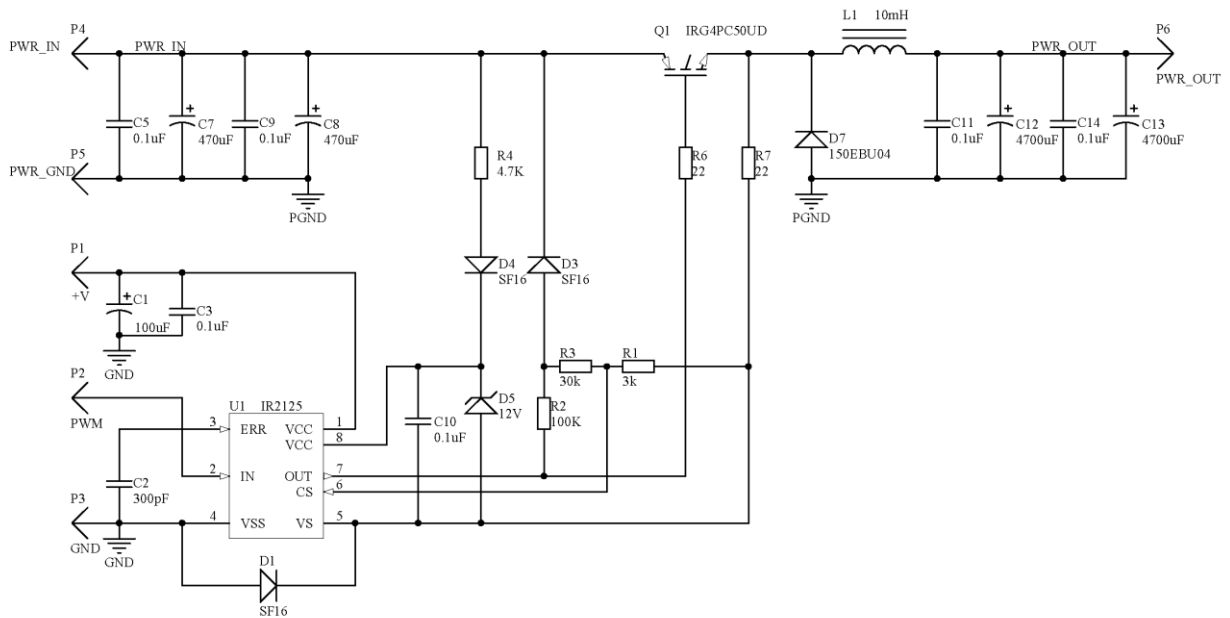


Рисунок 4.4 - Электрическая принципиальная схема силового ключа (Power Switch)

В схеме силового ключа на вход IN драйвера IR2125 приходит сигнал с управляющего контроллера (Рисунок 4.5), с вывода OUT выходит управляющий сигнал на затвор полевого транзистора IRG4PC50UD. Драйвер

IR2125 также осуществляет защиту от перегрузки по току в цепи транзистора: если значение тока в цепи транзистора выше максимально допустимого значения, то драйвер ограничивает управляющее напряжение на вход затвора транзистора.

Электрическая принципиальная схема управляющего контроллера изображена на Рисунке 4.5

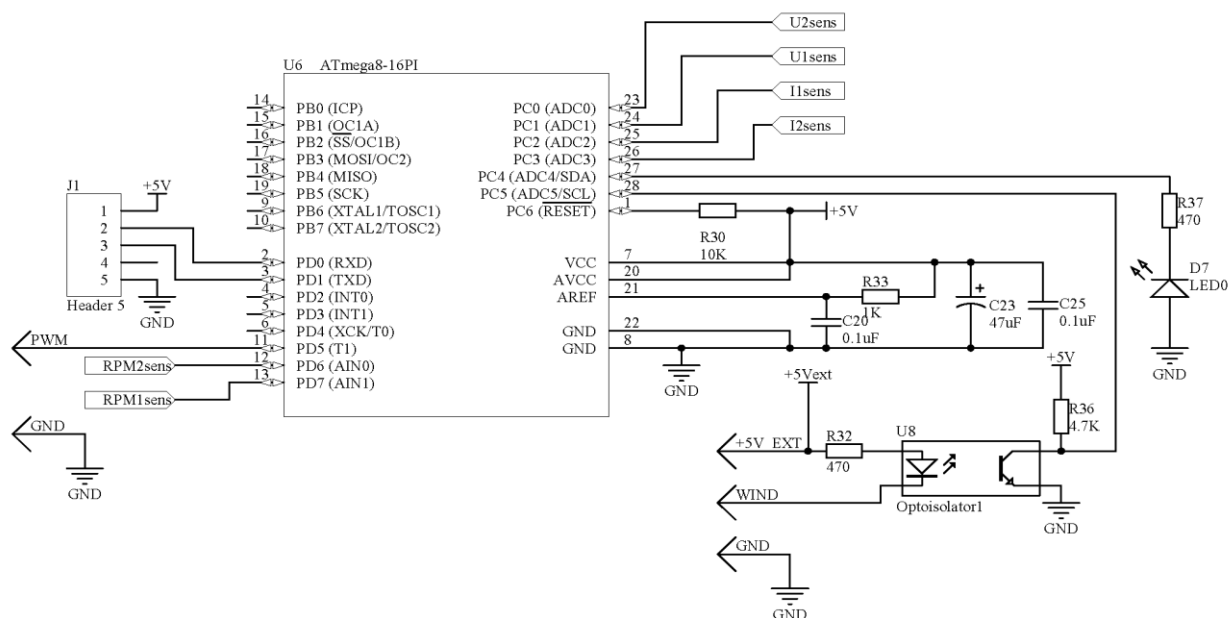


Рисунок 4.5 – Электрическая принципиальная схема управляющего контроллера

Ядром управляющего контроллера является микроконтроллер (МК) ATmega8-16PU.

На аналогово-цифровые порты (АЦП) микроконтроллера ADC0, ADC1, поступают значения напряжений U1 и U2. U1-напряжение на входе регулятора мощности, преобразованное с помощью делителя напряжения и операционного усилителя для порта АЦП МК ADC1. U2 – напряжение на выходе регулятора мощности, преобразованное делителем напряжения и операционным усилителем для порта АЦП МК ADC0.

С датчиков тока на эффекте Холла (ACS754) на порты АЦП МК ADC2, ADC3 поступают напряжения, пропорциональные току аккумуляторной батареи и силового ключа.

МК ATmega8-16PI обрабатывает полученные со входов сигналы по заданному алгоритму и с порта PD5 выдает ШИМ сигнал, управляющий электронным ключом понижающего импульсного преобразователя.

На рисунке 4.6 изображена схема, которая предназначена для обеспечения питания напряжениями 5 и 12 Вольт локальных компонентов системы управления: драйвера IR2125, датчиков Холла, операционных усилителей.

Основными компонентами этой схемы являются: микросхема UC3844N, управляющая напряжением на затворе полевого транзистора irf840, трансформатор T1, стабилизатор напряжения на 5 Вольт LM 7805, стабилизатор напряжения на 12 Вольт LM7812.

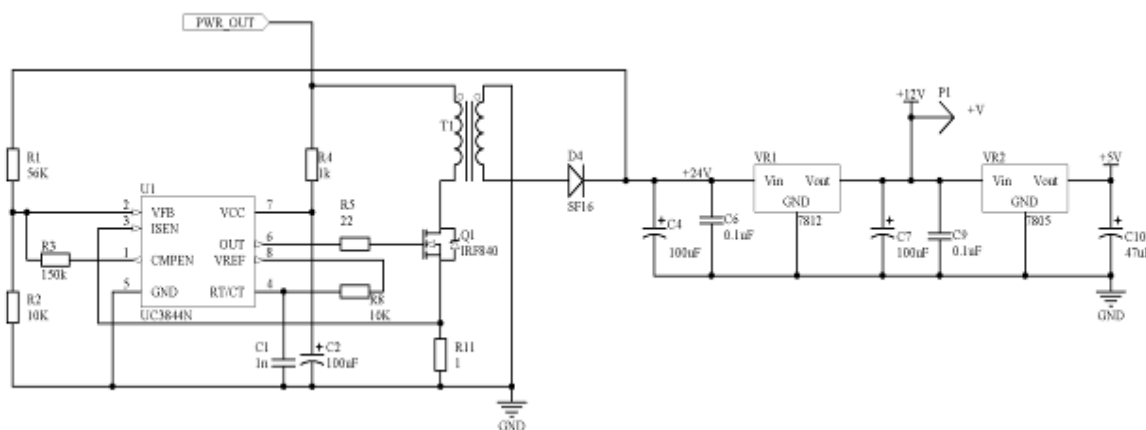


Рисунок 4.6 - Принципиальная схема компонентов контроллера

Датчики тока на эффекте Холла изображены на Рисунке 4.7

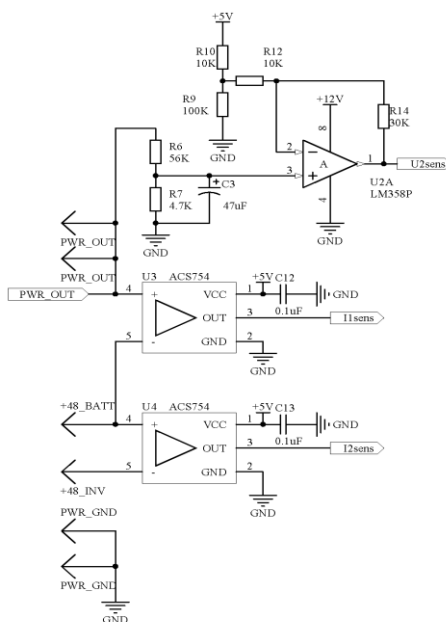


Рисунок 4.7 - Принципиальная схема компонентов контроллера

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

4.1 Выводы по главе

В результате анализа принципиальной схемы и алгоритма регулирования мощности ВЭУ можно сделать следующие выводы:

1. В результате анализа существующих типов преобразователей для тихоходных малых ВЭУ подходит понижающий импульсный преобразователь с выходом 48В постоянного тока. Повышающий преобразователь также может быть применен, однако для его работы необходимо большее количество аккумуляторных батарей, поэтому его целесообразно использовать для применения в ветровых зонах с резкими периодами ветровых нагрузок и длинными периодами затишья.

2. С целью оптимальной работы ВЭУ необходимо отслеживание аэродинамической характеристики ротора и отбор мощности не выше выдаваемой аэродинамической мощности.

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		89

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были выполнены следующие задачи:

1) Разработана имитационная компьютерная модель гибридного ветро-солнечного энергокомплекса.

2) С помощью имитационной компьютерной модели исследована производительность ветро-солнечной установки при применении различных способов и алгоритмов управления. Разработан алгоритм управления мощностью ветро-солнечного энергокомплекса, обеспечивающей высокую производительность ветро-солнечной установки.

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		90

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Безруких П.П. // Использование энергии ветра. М.: Колос, 2008
- 2 ГОСТ Р 51237–98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. № 460 от 25.12.1998.
- 3 ГОСТ Р 51990–2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Классификация. № 515 СТ от 25.12.2002
- 4 ГОСТ Р 51991–2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования. № 516 СТ от 25.12.2002.
- 5 Dawson M. H. Variable Length Wind Turbine Blade/ Dawson M. H., Lisa Barnet, Gibson Asuquo, Deborah Weems, Michael Schledorn, Marcus Farmer: Final Report DE-FG36-03GO13171.;
- 6 Дмитриева Г.А. Анализ работы неуправляемой ВЭУ в автономной системе // Электричество, 1998. № 6. — С. 16-23
- 7 Зубова Н. В. Разработка и проверка адекватности нечеткого контроллера для ВЭУ с изменяемым радиусом ветроколеса /
- 8 Зубова Н. В. Нечеткое управление ветротурбинами с изменяемой геометрией лопасти / С. Н. Удалов, В. З. Манусов, Н. В. Зубова, А. А. Ачитаев
- 9 Кирпичникова И.М. Моделирование комбинированной ветро-солнечной установки / И.М.Кирпичникова, С.А. Четошников // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – Саров, 2016 – №7-8(195-196). – С.25–31.
- 10 Коробатов, Д.В. Эффективные методы регулирования мощности устройств на основе возобновляемых источников энергии / Д.В. Коробатов, А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин, Е.А. Сироткин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – Саров, 2016 – № 11–12 (199–200). – С.69–78
- 11 Korobатов D. V., Martyanov A. S., Solomin E. V. Development of control algorithms in Matlab/Simulink // Procedia Engineering: International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015). —2015. — С. 922—926.
- 12 Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015.
- 13 Maksimovic D., Stankovic A., Thottuvelil V., "Modeling and simulation of power electronic converters," Proc. IEEE, vol. 89, pp.898-912, 2001.
- 14 Мартьянов, А.С. Исследование алгоритмов управления и разработка контроллера ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения: диссертация к-та техн. наук: 18.04.16 / А.С. Мартьянов ; Южно–Уральский гос. универ. – 2016. – 174с.
- 15 Мартьянов А. С., Соломин Е. В. Контроллер заряда ветроэнергетической установки // Альтернативная энергетика и экология. –

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		91

М.: НИИЭС. — 2010. — № 1. — С. 106—109.

16 Мартянов А. С., Пронин Н. В. Модель ветрогенератора ВЭУ-3 в пакете MATLAB // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. — 2012. — 37(296). — С. 143—145.

17 Мартянов А. С., Неустроев Н. И. Анализ электромеханических систем с помощью ANSYS MAXWELL // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС. — 2014. — 19(159). — С. 47—52.

18 Мартынов Н.Н., Иванов А.П. MATLAB 5.x: Вычисления, визуализация, программирование. М.: КУДИЦ- ОБРАЗ, 2000. 265 с.

19 Методика расчета понижающего преобразователя

<http://www.electrosad.ru/>

20 Carlin P.W. The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology/ P.W. Carlin, S. Laxson, E.B. Muljadi //Technical Report NREL/TP-500-28607, National Renewable Energy Laboratory, U.S.A. –2001.

21 Соломин, Е.В. Методологические основы разработки и создания вертикально–осевых ветроэнергетических установок для агропромышленного комплекса России: автореф. дис. д–ра техн. наук: 19.03.13 / Е.В. Соломин ; Алтайский гос.техн.универ. – 2013. – 412с.

22 Соломин, Е.В. Основы методологии разработки вертикально–осевых ветроэнергетических установок / Е.В. Соломин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – Саров, 2011 – №1. – С.18–39.

23 Соломин, Е.В. Масштабируемые гибридные ветро-солнечные установки малой мощности / Е.В. Соломин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – Саров, 2012 – №2. – С.49–60.

24 Соломин, Е.В. Методология разработки и создания вертикально–осевых ветроэнергетических установок: монография ISBN:9785696041995 / Е.В. Соломин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. – 2011. – 324с.

25 Стребков Д.С. Проблемы надежного энергообеспечения животноводства / Д.С. Стребков, А.В. Тихомиров // Сетевой научно–методический электронный агрожурнал.–2010.–Вып.1

26 Фролкова Н.О. Моделирование солнечных батарей на основе различных полупроводников: автореф. дис. к–та техн. наук: 05.27.01 / Н.О. Фролкова; Московский Энергетический Институт (Технический Университет) – 2011. – 179с.

27 Фролкова, И.О. Моделирование влияния температуры на выходную характеристику солнечных элементов / Н.О.Фролкова, О.А.Фролков //Материалы докладов 6-й межрегиональной НТК студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика»- 2009.- том 2.- С.80-83.

28 Фролкова, Н.О. Моделирование ВАХ батареи солнечных элементов / Н.О.Фролкова, О.А.Фролков // Материалы VIII-й ВНТК «Динамика

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		92

нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем».-2009.- С. 238-239.

29 Fesli U., Bayir R., Özer M. Design and implementation of a domestic solar-wind hybrid energy system //Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on. – IEEE, 2009. P. I-29-I-33.

30 Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки.-М.:ГНУ ВИЭСХ, 2006.-280 с.

31 Hui J., Bakhshai A., Jain P. K. A hybrid wind-solar energy system: A new rectifier stage topology //Applied Power Electronics Conference and Exposition (APPEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. – IEEE, 2010. P. 155–161.

32 Черных, И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем / И.В.Черных: [Электронный ресурс] (http://www.nsu.ru/matlab/MatLab_RU/simulink/book1/l.asp.htm).

33 Шапиро Л. Я., Засеев С. Г. Синхронный генератор ветроэнергетической установки с управляемым преобразователем в цепи статора //].

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		93

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программа в MATLAB/Simulink вертикально-осевого ветроколеса типа
Дарье

```
function [M,P,Cp,Z] = Vetrokoleso5 (Vv,Vg,S,R)

%расчет
if Vv>10
    Vv=10;
end
if Vg>32
    Vg=32;
end
Z=Vg/Vv;
a=1/Z-0.035;
Cp= ((18.3*a-4.2)*exp(-(5.15*a))+0.0068);
P = 0.5*Cp*1.2*S*(Vv^3);
M=P*R/(Vg);
```

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		94

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Программа в MATLAB/Simulink модели солнечного элемента

```
function I = solar_module(V, Tc, Isc_Tref_M,
Voc_Tref_M, Pmax_Tref_M, n, Np, Ns,G)

%КОНСТАНТЫ
k = 1.38e-23;
q = 1.60e-19;
Tref = 25 +273;
Gref = 1000;
T = Tc + 273;
a=6e-3;
Vg=1.12;
D=0;

Isc_Tref=Isc_Tref_M/Np;
Voc_Tref=Voc_Tref_M/Ns;
Is_Tref_c=Isc_Tref*(1-D/100);
Voc_Tref_c=Voc_Tref*(1-D/100);

Vt_Tref = n*k*Tref/q;
Voc_norm = Voc_Tref_M*(1-D/100)/(Vt_Tref*Ns);
L1 = log(Voc_norm+0.72);
FFo = (Voc_norm-L1)/(1+Voc_norm);
Rs_M=(Voc_Tref_M/Isc_Tref_M)-
(Pmax_Tref_M/(FFo*Isc_Tref_M*Isc_Tref_M));
Rs_c = Np*Rs_M/Ns;
Vt = n*k*T/q;

%Iph dependences
Iph_Tref = Is_Tref_c*G/Gref;
Iph = Iph_Tref + a*(T-Tref);

%Ток насыщения при эталонной температуре
Is_Tref = Is_Tref_c/( exp(q*Voc_Tref_c/(n*k*Tref))-1);
%Ток насыщения
Is = Is_Tref*(T/Tref).^ (3/n) .*exp(-q*Vg/(n*k) .* ((1./T)-
(1/Tref)));
%Вычисление последовательного сопротивления

Vc =V/Ns;
```

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		95

```
Rr=Rs_c/Np;
```

```
I = zeros(size(Vc)) ;
```

```
%Метод Ньютона для выходной характеристики
```

```
for j=1:5;
```

```
I = I - (Iph.*Np - I - Np.*Is.*(exp((Vc+I.*Rr)./Vt) - 1)) ./ (-1 -  
Np.*Is.*(exp((Vc+I.*Rr)./Vt)).*Rr./Vt);
```

```
end;
```

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		96

ПРИЛОЖЕНИЕ С

Программа в MATLAB/Simulink создания графиков зависимости мощности вертикально-осевого ветроколеса типа Дарье от скорости ветроколеса при различных значениях скоростях ветра

```
Vg = 1:40;
P(1:length(Vg))=0;
for i = 1:length(Vg)

% Расчет графика при скорости ветра 3 м/с
Vv=3;
Z=Vg(i)/Vv;
a=(1/Z-0.035);
Cp=((18.3*a-4.2)*exp(-(5.15*a))+0.0068);
P(i) = 0.5*Cp*1.2*12.92*Vv^3;
% Рисование очередного графика
end
plot (Vg, P)

for i = 1:length(Vg)

% Расчет графика при скорости ветра 5 м/с
Vv=5;
Z=Vg(i)/Vv;
a=(1/Z-0.035);
Cp=((18.3*a-4.2)*exp(-(5.15*a))+0.0068);

P(i) = 0.5*Cp*1.2*12.92*Vv^3;
% Рисование очередного графика

end
hold on
plot (Vg, P, 'g')

for i = 1:length(Vg)

% Расчет графика при скорости ветра 7 м/с
Vv=7;
Z=Vg(i)/Vv;
a=(1/Z-0.035);
```

					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		97

```

Cp=( (18.3*a-4.2)*exp(-(5.15*a))+0.0068);

P(i) = 0.5*Cp*1.2*12.92*Vv^3;
% Рисование очередного графика

end

hold on

plot (Vg, P, 'm')

for i = 1:length(Vg)

% Расчет графика при скорости ветра 9 м/с
Vv=9;
Z=Vg(i)/Vv;
a=(1/Z-0.035);
Cp=( (18.3*a-4.2)*exp(-(5.15*a))+0.0068);

P(i) = 0.5*Cp*1.2*12.92*Vv^3;
% Рисование очередного графика

end
hold on

plot (Vg, P, 'k')

for i = 1:length(Vg)

% Расчет графика при скорости ветра 10 м/с
Vv=10;
Z=Vg(i)/Vv;
a=(1/Z-0.035);
Cp=( (18.3*a-4.2)*exp(-(5.15*a))+0.0068);

P(i) = 0.5*Cp*1.2*12.92*Vv^3;
% Рисование очередного графика

end
hold on
plot (Vg, P, 'r' )
grid on;
title('График зависимости мощности P от скорости
ветроколеса при разных скоростях ветра');

```


					130402.2019.572.11.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		99